



PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS REDES RACIONALES DE EXPLORACIÓN DE LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS DE NÍQUEL Y COBALTO EN LA REGIÓN DE MOA.

León Ortelio Vera Sardiñas⁽¹⁾, Arístides Alejandro Legrá Lobaina⁽²⁾

(1) Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Las Coloradas s/n, Moa, Holguín, Cuba. E-mail: overa@ismm.edu.cu

(2) Departamento de Matemática. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Las Coloradas s/n, Moa, Holguín, Cuba. E-mail: alegra@ismm.edu.cu

RESUMEN

El trabajo de investigación que se expone, Procedimiento para la Determinación de las Redes Racionales de Exploración de los Yacimientos Lateríticos de Níquel y Cobalto en la Región de Moa muestra los resultados obtenidos en la elaboración de un sistema de algoritmos para determinar las densidades de las redes de exploración más racionales para el estudio de dichos yacimientos sobre la base de un análisis geológico y geoestadístico.

El empleo de herramientas avanzadas en el campo de la geoestadística como son el *Kriging* puntual y de bloque, los variogramas, la simulación de redes y la determinación de errores de estimación, entre otros, permitió arribar a un procedimiento, utilizable, con un adiestramiento previo, por los geólogos dedicados a la prospección y exploración de estos tipos de yacimientos.

Se exponen además algunos resultados de la aplicación del procedimiento en dos bloques pertenecientes a dos dominios geológicos del yacimiento Punta Gorda, dominios que fueron determinados especialmente para este trabajo y finalmente se presenta un cuerpo de conclusiones que se refieren a los aportes científicos realizados durante la investigación así como un grupo de recomendaciones relacionadas con la aplicación práctica del procedimiento presentado y con nuestras consideraciones para la continuación de estos trabajos.

ABSTRACT

The investigation that is exposed "Procedure for the Determination of the Rational Nets of Exploration of the lateritics ore body of Nickel and Cobalt in the Region of Moa" show the results obtained in the elaboration of a system of algorithms for to determine the densities of the most rational exploration nets for the study of this ore body on the base of a geologic and geostatistical analysis.

The employment of advanced tools in the field of the geostatística like they are the Punctual Kriging and of Block, the variograms, the simulation of nets and the determination of estimate errors, among other, it allowed to arrive to a procedure, usable, with a previous training, for the geologists dedicated to the prospecting and exploration of these types of ore body.

They are also exposed some results of the application of the procedure in two blocks belonging to two geologic domains of the ore body Punta Gorda, domains that were determined especially for this work and finally a body of conclusions is presented that refer to the scientific contributions carried out during the investigation as well as a group of recommendations related with the practical application of the presented procedure and with our considerations for the continuation of these works.

Introducción

Desde que se iniciaron los estudios de los primeros yacimientos lateríticos de Níquel y Cobalto en el mundo, han sido realizados numerosos intentos para determinar las densidades más racionales de las redes de exploración, que permitieran una mayor exactitud en la evaluación y



cálculo de recursos y reservas, como resultado de lo cual se han desarrollado numerosos métodos que con diferentes grados de aproximación permiten establecer las densidades de las redes de exploración.

En la literatura especializada (Bustillo R. M. y C. L Jimeno, 1997, Lepin O. V. y J. Ariosa 1986) son conocidos cuatro métodos clásicos principales:

- a) De analogía b) De enrarecimiento c) Analítico d) De comparación de los resultados de la exploración con la explotación.

La experiencia acumulada demuestra que cada yacimiento y dentro de él cada sector o dominio geológico, tienen sus características propias y que cada caso concreto requiere del análisis particular, a partir del cual se tomarán las medidas más adecuadas en cuanto a las densidades de redes a utilizar.

Dentro del conjunto de informes consultado para la realización de la presente investigación, en los que se proponen redes (1,4,6,7,8,10,11,12,13) se observa que, excepto en unos pocos casos, estas se establecen de forma global para todo el yacimiento, lo cual entra en contradicción con la propia heterogeneidad de los mismos, y como se ha dicho anteriormente, se requieren redes diferentes para cada uno de los sectores con características propias.

El Problema Científico abordado consiste en que los métodos tradicionales empleados en la región de Moa para establecer las densidades de las redes de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto, al no tener en cuenta las características de los diferentes dominios geológicos de los yacimientos, sus variabilidades y no aplicar un modelo adecuado, no responden a las características complejas de estos yacimientos y sólo permiten establecer redes con carácter regional para todo el yacimiento.

El objetivo de la investigación es elaborar un procedimiento general para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa.

Como **objetivo específico** se plantea obtener los dominios geológicos del Yacimiento Punta Gorda sobre la base del comportamiento de sus parámetros geomorfológicos, geológicos y geoquímicas

La hipótesis de partida se basa en que si se conoce el comportamiento de la variabilidad de los parámetros geológico – industriales de los yacimientos lateríticos de Ni y Co, se escogen las variables más informativas y se utiliza el modelo adecuado, entonces es posible establecer las redes racionales para su exploración, dado el hecho de que la densidad de la red de exploración estará siempre en función de la complejidad geológica del yacimiento estudiado y del modelo que se utilice.

Materiales y Métodos

La base teórica fundamental sobre la cual descansó la investigación estuvo dada por el voluminoso arsenal bibliográfico sobre los yacimientos lateríticos de la región objeto de estudio,



así como las herramientas computacionales existentes y que crearon nuestros colaboradores que hicieron viable todo el procesamiento geoestadístico de la voluminosa base de datos del yacimiento Punta Gorda. Entre dichas herramientas se destacan el programa "Tierra", versión 1.5.5 del 2000, los programas: Excel 2000, Access 2 000 (9.0.2812), Surfer 7 (1999) así como los programas: GRD Rios, Morf GRD, Red GRD, elaborados específicamente para la selección de dominios geológicos en este trabajo.

Los principales métodos de investigación aplicados fueron:

- 1) Análisis de documentos de las empresas: informes geológicos, bases de datos, proyectos e informes de investigación, etc.
- 2) Modelación numérica.
- 3) Simulación y experimentación computacional.

Resultados y Discusión.

Análisis geológico integral general del yacimiento

Con el objetivo de lograr poblaciones de datos relativamente homogéneas para la aplicación eficiente del procedimiento que se propone se establecieron por primera vez los dominios geológicos en el yacimiento Punta Gorda, para lo cual fue necesario elaborar 17 mapas de variables tales como potencias de la corteza total, de la capa útil y de escombro, mapas de contenidos de hierro, de níquel y de cobalto, tanto en la corteza total como en la capa útil, así como los mapas hipsométrico, de pendientes, de rugosidad del relieve y del fondo, de densidad de morfoalineamientos, de densidad de drenaje, y los de disección vertical y horizontal, así como el mapa de dominios geológicos (fig. 1).

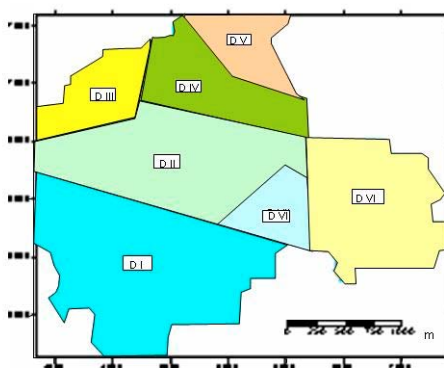


Fig. 1. Dominios geológicos. Yacimiento P. Gorda

25

Procedimiento propuesto para la densificación racional de redes para pasar de una etapa a otra (de la etapa E_j a la etapa E_{j+1} .)

El problema principal es definir cuantas y donde deben tomarse las muestras lo cual, se reitera, depende fundamentalmente, además de la existencia de condiciones reales para realizar el muestreo, de la complejidad de los parámetros P_i , de los errores permisibles e_{ij} y del modelo que se use.



Paso 1: Definición de los parámetros P_i y de las etapas E_j .

Consiste en definir explícitamente los parámetros y etapas en que se desarrollará el reconocimiento del dominio que se estudia.

Para el yacimiento Punta Gorda, que explota la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara y donde se ha aplicado el presente procedimiento hemos trabajado con los parámetros: potencia de escombros, potencia de mineral útil, contenido de níquel y contenido de hierro.

Paso 2: Precisar las necesidades de mejorar el conocimiento de cada parámetro P_i .

Si no se tiene definido el conjunto de paneles BN_j para la red actual, deben definirse antes de considerar los paneles para la nueva etapa (Fig. 2).

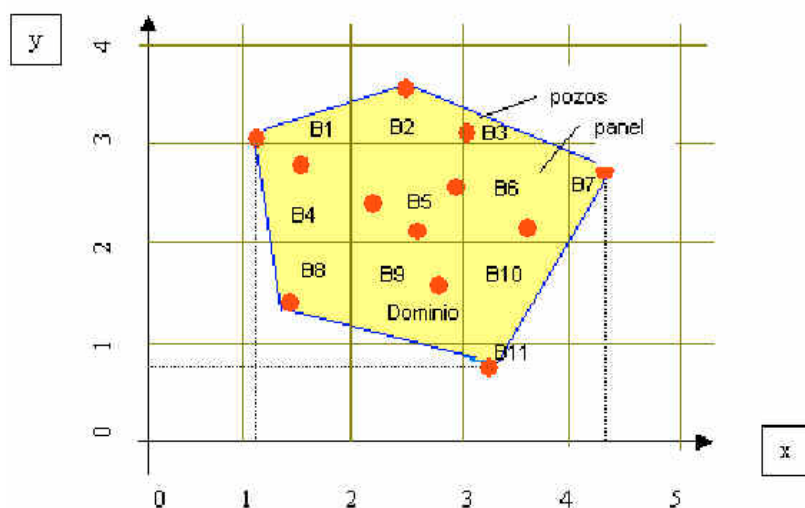


Fig. 2. Ilustración del trazado de paneles

Primero debe definirse en cuales zonas del dominio se necesita conocer el valor del parámetro P_i con el error definido para la nueva etapa. Esto implica la necesidad de definir un nuevo conjunto BN_{j+1} de paneles en los cuales es necesario mejorar el conocimiento lo cual puede orientar posteriormente sobre una versión preliminar de la nueva red de muestreo.

El tamaño de los paneles depende de varios factores relacionados con el grado de conocimiento que se desee tener en cada etapa pero siempre es necesario que sea cubierto con estos paneles todo el dominio D que se analiza. Una forma de lograrlo para redes cuadradas es tomando una red auxiliar regular, y estimar los paneles del tamaño del área de la zona de influencia que se considera usualmente para la red que se tiene. Gráficamente puede ilustrarse como se muestra en la figura 2.

Paso 3: Creación del escalafón de los parámetros P_i .



En este paso deberá realizarse un estudio completo de las variabilidades para cada parámetro P_i , a partir de la información disponible sobre ellos, con el objetivo de definir el orden o escalafón de variabilidad de dichos parámetros.

Metodológicamente se propone que los elementos a analizar sean:

- Coeficiente de Variación. Calculados sobre la base de: a) media aritmética, b) media geométrica, c) mediana, d) media cuadrática.
- Coeficiente de variabilidad de Pearson en las direcciones norte - sus y este – oeste.
- Determinación de la estructura de los datos separando la componente aleatoria de la componente determinística (si existe) mediante la realización de los análisis de tendencia. Matemáticamente el comportamiento de $P(x,y)$ se describe mediante una función del tipo:

$$P(x,y) = T(x,y) + A(x,y)$$

donde $T(x,y)$ es la componente determinística y $A(x,y)$ es la componente aleatoria o casual.

- Análisis de covarianza y de componentes principales entre todas las variables y grupos de ellas. En este paso pueden crearse nuevas variables que reflejen la variabilidad de un grupo o de todas las variables originales y esto no solo tiene la ventaja de sintetizar el trabajo sino que además permite detectar relaciones importantes entre los parámetros.
- Variabilidad Geoestadística de cada variable original o creada.

Se utilizan las herramientas de la Geoestadística debido a la conocida capacidad que tiene esta rama de la Matemática Aplicada, al ser utilizada correctamente, de reflejar de manera fidedigna el comportamiento de estos parámetros. Debe destacarse que el *Kriging Puntual y de Bloque* serán utilizados en la medida que sean más adecuados a los propósitos de la modelación. Por otra parte se usará *Kriging Ordinario* para comportamientos estacionarios, *Kriging Ordinario con Trend* para comportamientos no estacionarios y *Kriging Universal* para comportamientos cuasi-estacionarios según lo aconsejen las consideraciones que surjan del análisis variográfico de los datos.

Paso 4: Comprobar para cada parámetro P_i si la red actual satisface (o no satisface), con el modelo seleccionado, el nuevo grado del conocimiento que se necesita.

Para esto se pueden aplicar los siguientes algoritmos:

- a. Número Rojo de Osedsky (Lepin, O. Y Ariosa I. J, 1986)
- b. Análisis de Errores de *Kriging*: Consiste en el cálculo del error del parámetro P_i , en cada panel del conjunto de nuevas celdas o paneles del conjunto BN_{j+1} a partir de los n puntos de la red (o de una parte de estos puntos) de la etapa actual E_j . El error calculado E_p no debe ser mayor que el error $e_{i,j+1}$ prefijado para la etapa E_{j+1} . Dicha estimación se realizará mediante *kriging de bloque* de manera que en cada panel se obtiene el valor:

$$Ep = \frac{\sigma_{Est.}}{P_{iEst.}} \times 100$$

Donde $P_{iEst.}$ es el valor estimado del parámetro y $\sigma_{Est.}$ es la raíz cuadrada de la varianza de estimación (error de estimación). Si Ep es menor que $e_{i,j+1}$ para todos los paneles de BN_{j+1} ,



entonces la red actual es suficiente para conocer cada parámetro P_i en la próxima etapa y se procede a ejecutar el Paso 7. En caso contrario deberá realizarse el Paso 5.

Paso 5: Establecer los nuevos posibles puntos de muestreo.

Se establece una nueva malla regular de puntos que podrán ser parte del posible muestreo. En esta nueva malla (que puede o no coincidir con los nuevos paneles) el lado de la cuadrícula de la red será:

$$\alpha_2 = \alpha_1 / F_o$$

Donde: α_2 – Lado de la nueva malla de muestreo

α_1 – Lado de la malla de muestreo anterior

F_o – Factor de reducción, siempre mayor que 1.

Con lo cual se calcula el número máximo de puntos posible de una nueva red regular mediante la expresión:

$$n_{\max} = \frac{A_{\text{Total}}}{\alpha_2^2}$$

Donde: $n_{\max}$ – Número máximo de puntos en la nueva red

A_{Total} – Area total del dominio que se analiza

Esta distribución debe realizarse de acuerdo con las proporciones de los lados del rectángulo formado y tratando que compongan una red regular (debido a que en las redes regulares los errores por *Kriging* disminuyen con respecto a las redes irregulares). Si se eliminan algunos o todos los puntos que están fuera de la frontera del dominio, lo cual no siempre es conveniente hacer, y los que coinciden con puntos de la red actual que analizamos, quedarán los n^1 puntos posibles de la nueva red de muestreo. Gráficamente esto se ilustra en la Fig. 3.

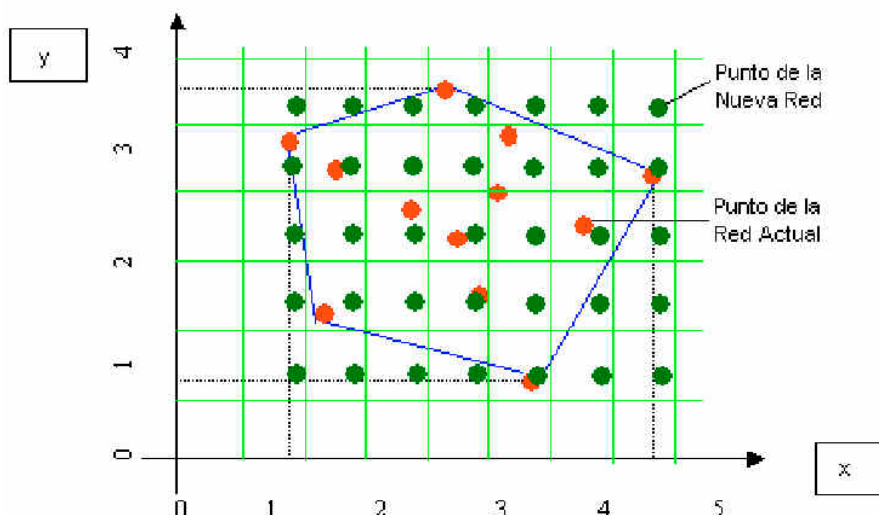


fig. 3. Determinación de los nuevos posibles puntos de muestreo

En este caso se tiene que $n_{\max} = 35$ y $n^1 = 16$, ya que 16 puntos están evidentemente fuera de la frontera del dominio y se considera la coincidencia de 3 puntos (aunque hay otros tres que valdría la pena analizar). También se ha representado el conjunto de nuevos paneles donde se definirá el nuevo conocimiento del dominio D. Nótese que los puntos de la nueva red no tienen



que estar obligatoriamente en el centro de cada panel aunque esto es deseable; tampoco es imprescindible que cada panel contenga al menos un punto de la nueva red ya que puede no tener ninguno o tener uno o más puntos.

Paso 6: Determinación de la nueva red

Para la determinación de la nueva red se asume el modelo geoestadístico por ser el más adecuado ya que además de presentar las herramientas necesarias, es capaz de reflejar las características esenciales de la variabilidad del parámetro que se estudia, dadas por el variograma general y los resultados del análisis de la anisotropía y de la zona de influencia.

En el marco de esta investigación se asumió dentro de los modelos geoestadísticos el *kriging*, al ser el mejor estimador lineal insesgado ya que minimiza la varianza de estimación [Chica Olmo M. 1989; García P. 1988] por lo que mediante el error de *kriging de bloque* se reflejará la confiabilidad del conocimiento nuevo que se obtendrá con la nueva red y este valor será el que definirá la credibilidad de la red que simularemos en los n^1 puntos propuestos en el Paso 5.

Como se ha planteado en el Paso 4 en cada panel de BN_{j+1} , se tiene el valor Ep que expresa el error porcentual del valor estimado. Entonces se puede señalar el panel $B_{MayorEp}$ donde se halla el mayor de los módulos de los Ep ; se le agrega a la red actual el punto (x,y,P_{Est}) de la nueva red propuesta que esté más cercano al centro del panel $B_{MayorEp}$; a continuación eliminamos el punto agregado del conjunto G de los datos que están en la nueva red y no están en la actual y se repite el Paso 4 para comprobar si la red actual satisface, con el modelo seleccionado, el nuevo grado del conocimiento que se necesita para el parámetro que se analiza y se repite luego el Paso 6.

Paso 7: Determinación de la concentración racional de puntos.

Para la determinación de una red regular racional de puntos se parte del momento en que a la red actual, a la que llamaremos RED_F se le han adicionado los puntos necesarios que permiten satisfacer, con el modelo seleccionado, el nuevo grado del conocimiento que se necesita en los paneles de BN_{j+1} . Es decir que en cada uno de los paneles el error Ep sea menor que el error máximo permisible para dicha etapa. (observese la fig. 4)

Esta nueva red tendrá n_F puntos y se cumplirá generalmente que el número de puntos de la nueva red n_F será menor o igual que el número de puntos totales simulados n^1 en el conjunto BN_{j+1} . Si llamamos a $d_F = n^1 - n_F$ entonces la eficiencia particular de la nueva red queda expresada por:

$$EF = d_F / n^1 \times 100$$

Esto no significa que no pueda obtenerse otra red mejor, lo que se puede comprobar tomando $F_o = F_{o \text{ anterior}} + INC$ en la expresión $\alpha_2 = \alpha_1 / F_o$, donde INC es una variable positiva que refleja la disminución del lado de la red, recomendándose tomar el valor $INC = 1$ al pasar de una red a otra más densa, repitiéndose los pasos 4, 5 y 6.

Debe aclararse que no se densifican los paneles, si no la red de muestreo.

Si se repite este proceso para $F = F_o + INC_1, F_o + INC_2, \dots, F_{o \text{ max}}$, entonces se podrá definir cual de las redes RED_F es mejor, atendiendo a la cantidad de nuevos puntos que se tengan en cada una de ellas, a los errores que se esperan y a la relación de estos puntos de la nueva red con otras propiedades cualitativas y cuantitativas del Modelo Geológico Integral del dominio que se



analiza y que no se han podido reflejar en el Análisis Variográfico y en el *Kriging* y que por supuesto tengan algún interés para el geólogo y el minero.

El valor de $F_{o\max}$ deberá ser aquel que para los nuevos puntos del conjunto G que él determina es el último donde:

$$\text{Costo de la Red} \leq \text{Ingresos} - \text{Otros Costos} - \text{Ganancias Esperadas}$$

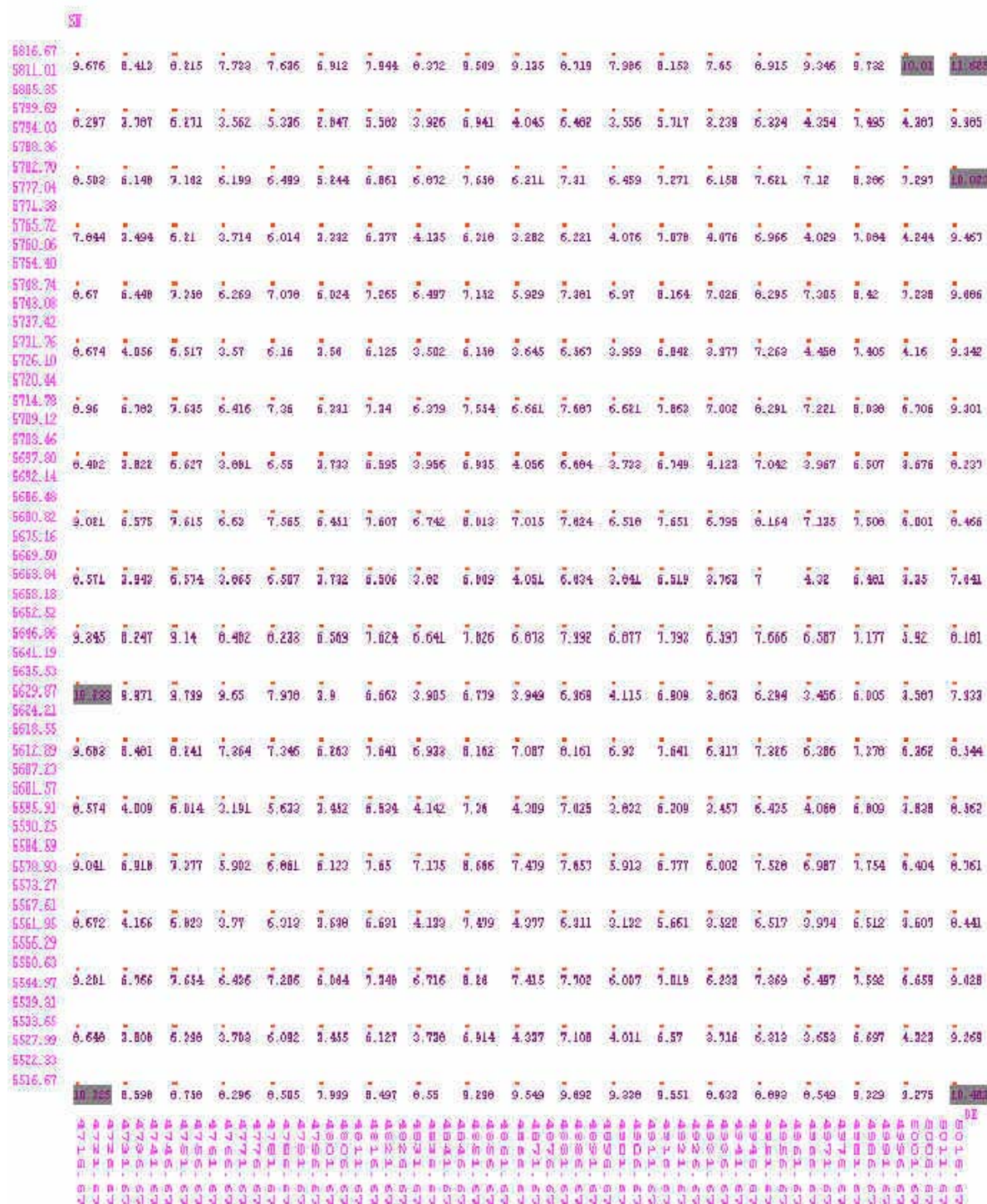


Fig. 4. Resultados del error de estimación en los paneles de lado 16.66m modelados a partir de la red de muestreo de 33.33m en el O –48, para el parámetro contenido de níquel. (Los fondos grises corresponden a los paneles donde los errores de *kriging* de bloque entre los valores estimados, multiplicados por 100, sobrepasan el 10%).



Conclusiones

1. El procedimiento presentado para la determinación de redes racionales de exploración, basado en un análisis geológico y geoestadístico por dominios geológicos responde a las necesidades en cuanto al grado de conocimiento necesario en cada etapa de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa.
2. La aplicación de este procedimiento permitirá racionalizar los trabajos de exploración de estos yacimientos puesto que solo se realizarán los muestreos imprescindibles en las posiciones geométricas más adecuadas, con el consiguiente efecto económico positivo y con la obtención de resultados más confiables y científicamente argumentados.
3. Se obtuvo por primera vez, a partir del procesamiento de toda la información geológica disponible del Yacimiento Punta Gorda, la delimitación de sectores con características relativamente homogéneas, (Dominios Geológicos) y se incrementó su grado de conocimiento geológico.
4. El procedimiento presentado, basado en los conceptos geológicos y tecnológicos principales que se manejan en la industria cubana del níquel así como en elementos básicos de la Matemática Geológica actual, puede ser aplicado por el personal técnico de nuestras minas, de las empresas de proyectos y de la ONRM, después de un entrenamiento adecuado.

Recomendaciones

1. Introducir el presente procedimiento como base metodológica para tomar decisiones en cuanto a la racionalización de redes de exploración en los yacimientos lateríticos de la región de Moa.
2. Estudiar la posibilidad de elaborar una metodología técnica particular para clasificación de recursos y reservas en los yacimientos lateríticos cubanos, sobre la base de este procedimiento y de la legislación vigente que se relaciona con este tema.

Referencias bibliográficas.

- Arias del T. J. A., 1984. Geometrización y Variabilidad de un Sector del Yacimiento Martí. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín.
- Bustillo R. M. y C. L. Jimeno., 1997. Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras, Madrid: Entorno Gráfico S.L.
- Chica Olmo M., 1989. Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales. Tesis doctoral. Universidad de Granada, Granada.
- Garcell P. y Ricardo A., 1988. Investigación de la variabilidad cuantitativa y cualitativa de la zona del yacimiento Moa. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín.
- García, P. A., 1988. Geoestadística Operacional. Ministerio de Minas y Energía. Departamento de Producción Mineral, Brasilia,
- Ilidio L. D., 1999. Análisis Variográfico del Yacimiento Camarioca Norte. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín.
- Jordan R. M., 2000. Análisis Variográfico del Grupo VII del Yacimiento Martí. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín.
- Lavaut C. W., 2 000. Sobre el Estudio Preliminar de las Redes de Perforación y Muestreo para el Cálculo del Mineral Laterítico. E.G.M. Santiago de Cuba.
- Lepin O. V. y J. D. Ariosa., 1986. Búsqueda, Exploración y Evaluación Geólogo – Económica de los Yacimientos Minerales Sólidos. Primera parte. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana.
- Leyva R. R. y E. F. Soler., 1984. Racionalización de las Redes de Perforación de Escombro en los Yacimientos Ferroniquelíferos de Nicaro. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín.



- López A. J., 1981. Cálculo de las redes óptimas para el estudio de los yacimientos niquelíferos de la Empresa Comandante René Ramos Latourt. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, Holguín.
- López D. J., 1986. Cálculo de las redes óptimas del Yacimiento Camarioca Este, Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, Holguín.
- Pérez R., 1972. Estudio preliminar sobre redes de exploración. Informe. Empresa Comandante René Ramos Latourt.