



Rem: Revista Escola de Minas

versão impressa ISSN 0370-4467

Rem: Rev. Esc. Minas v.54 n.2 Ouro Preto abr./jun. 2001

doi: 10.1590/S0370-44672001000200012

Mineração

Estimativa de incerteza na classificação de recursos minerais por simulação geoestatística

Luis Eduardo de Souza

Eng. de Minas, Mestrando do PPGEM, UFRGS - E-mail: esouza@ufrgs.br

Fernando Gambin

Eng. de Minas, Mestrando do PPGEM, UFRGS - E-mail: gambin@ufrgs.br

João Felipe C.L. Costa

Eng. de Minas, Prof. Dr. do DEMIN, UFRGS - E-mail: jfelipe@ufrgs.br

Jair Carlos Koppe

Eng. de Minas/Geól., Prof. Dr. do DEMIN, UFRGS - E-mail: jkoppe@ufrgs.br

Serviços

-  Serviços customizados
-  Artigo em XML
-  Referências do artigo
-  Curriculum ScienTI
-  Como citar este artigo
-  Acessos
-  Citado por SciELO
-  Similares em SciELO
-  Tradução automática
-  Enviar este artigo por email

Resumo

O sucesso de um novo empreendimento de mineração depende muito da recuperação de tonelagens e teores estimados, usando informações obtidas durante campanhas de exploração mineral. Essas estimativas deveriam ser capazes de alertar para possíveis altos riscos na classificação de recursos, possivelmente construídas usando intervalos de confiança associados com cada estimativa.

As categorias de recursos minerais são definidas de acordo com o espaçamento entre amostras e com o grau de confiabilidade em cada classe de recurso, a ser medida, indicada e inferida. Vários sistemas de classificação estão disponíveis, mas, para esse estudo, o sistema JORC (Joint Organisation Reserves Committee) foi utilizado. Esse artigo propõe uma metodologia para verificar a incerteza associada com volumes e tonelagens relacionados no inventário de um depósito mineral. Para ilustrar a metodologia, um depósito de carvão no sul do Brasil foi utilizado. Nesse depósito, estavam disponíveis 340 furos de sondagem com dados de espessura e 236 com informações sobre densidade. Os resultados forneceram ferramentas para medida da incerteza baseadas em um procedimento com embasamento teórico.

Palavras-chave: Geoestatística, simulação condicional, classificação de recursos/reservas.

Abstract

The success of a new mine depends highly on the recovery of tons and grades estimated using the information gathered during a mineral exploration survey. These estimates should be able to alert for possible risk or uncertainty in resource estimates, possibly built using confidence intervals associated with each estimate. Categories of mineral resources are divided according sample spacing and on the degree reliability at each class of resources, namely measured, indicated and inferred. Various systems of classification are available world wide and for the purpose of this study the JORC (Joint Organization Reserves Committee) system was employed. This paper proposes a methodology to assess uncertainty associated with volume and tonnages reported in a mineral deposit inventory. To illustrate the methodology a coal deposit in South Brazil was used. On this deposit 340 drill holes were available containing coal thickness data and among them 236 contain coal seam specific gravity measurements. The results provided the tools to measure the uncertainty based on a sound theoretical procedure.

Keywords: Geostatistics, conditional simulation, resources/reserves classification.

1. Introdução

Desde 1994, o Conselho de Instituições de Mineração e Metalurgia (CMMI), entidade internacional congregando instituições dos Estados Unidos (SME), Austrália (AusIMM), Canadá (CIM), Reino Unido (IMM) e África do Sul (SAIMM), tem trabalhado na criação de um conjunto de definições para relatório e classificação de recursos e reservas minerais. Essas definições foram posteriormente adotadas pelo comitê estabelecido em 1998 pelas Nações Unidas, dando-lhe, assim, um caráter verdadeiramente internacional. O sistema atualmente em uso na Austrália e que segue os padrões das Nações Unidas, conhecido por JORC, é reconhecido como uma das propostas mais avançadas e organizadas para descrever reservas e recursos minerais (AusIMM, 1999). Essas normas apresentam grandes diferenças, quando comparadas com o sistema atualmente utilizado no Brasil para depósitos de carvão, principalmente no aspecto relacionado ao espaçamento requerido de amostragem. O sistema JORC requer que os pontos de observação sejam mais próximos que o sistema brasileiro, para qualquer das classes de recursos (Tabela 01), o que torna esse sistema mais rigoroso na definição das classes. Sendo mais rigoroso, os resultados obtidos com esse sistema conduzem a valores mais conservadores, se comparados aos recursos que poderiam ser obtidos via sistema brasileiro.

Tabela 01 - Normalização do sistema JORC para definição de classes de recursos de carvão.

Classe de recurso	Extrapolação máxima (m)	Espaçamento máximo entre amostras ⁽¹⁾	Nível de confiabilidade
Medido	500	+ 1 km; < 500 m	0 - 10%
Indicado	1.000	+ 2 km; < 1 km	10 - 20 %
Inferido	2.000	+ 4 km	> 20%

⁽¹⁾ A primeira distância é o limite aceitável e a segunda é a distância normalmente utilizada.

As principais classificações de recursos minerais adotadas no mundo estão baseadas, principalmente, na confiança associada às estimativas e no espaçamento das amostras disponíveis. Tais classificações usam o grau de certeza de recursos como fator discriminante entre as várias classes. Nenhum desses esquemas, entretanto, mostra claramente como se calcula o erro ou o nível de confiabilidade associado a uma dada estimativa, apesar de, na maioria dos códigos dos países anteriormente citados e mesmo nos padrões das Nações Unidas, ter sido proposto o uso de geoestatística como ferramenta que permite uma rápida e não tendenciosa identificação de categorias de recursos/reservas. Como consequência da dificuldade em quantificar o erro de estimativa, utiliza-se uma área de influência subjetiva (distância) em torno dos furos de sondagem como um critério para discriminação entre recursos.

Os métodos tradicionais de classificação de reservas desenvolvidos e utilizados até hoje se baseiam em procedimentos simplificados e variam, principalmente, nos tópicos referentes aos princípios ou às técnicas de interpolação. Esses métodos buscam produzir a melhor estimativa local sem levar em conta as relações globais entre os valores estimados ou a variância local, não fornecendo medidas eficazes da incerteza na estimativa e

nem subsídios para enquadramento dos recursos nas classes de recursos estabelecidas - medida, indicada e inferida (Yamamoto, 1991). Ao contrário dos métodos clássicos de estimativa, a simulação geoestatística condicional busca reproduzir, em suas realizações, a estatística (histograma) e as feições globais (variograma) dos dados, primando por reproduzir a variabilidade local e a continuidade espacial dos dados originais, permitindo mapear e caracterizar a incerteza associada a uma estimativa, atendendo os requisitos para classificação de recursos.

Nesse estudo, é proposta uma metodologia que faz uso de simulação geoestatística para quantificar a incerteza na estimativa dos recursos minerais de um depósito de carvão no sul do Brasil.

2. Metodologia

A simulação condicional é uma ferramenta geoestatística para produção de modelos em escala detalhada que reproduzem tanto as características espaciais quanto as estatísticas de um depósito mineral. A idéia básica do método de simulação é gerar múltiplas realizações equiprováveis para cada elemento estudado, verificando a amplitude de variação entre os vários cenários equiprováveis e, com isso, estimar a magnitude do erro associado a uma dada estimativa, fornecendo subsídios para análises de risco (Goevaerts, 1997). As simulações são condicionadas pelos dados conhecidos e honram a continuidade espacial modelada pelo variograma e não são suavizadas, preservando a variabilidade local do depósito.

As informações disponíveis consistiam de 340 furos de sondagem com dados de espessura e, como a distribuição dos valores de densidade não era homogênea dentro do depósito, foi decidido modelar essa variável de maneira análoga. Em termos de amostras disponíveis para o propósito de avaliação, 238 furos com dados de densidade foram utilizados no modelamento.

A partir dos critérios estabelecidos pelo JORC, no que se refere à distância máxima entre amostras e à extrapolação máxima admissível, foram estabelecidos os limites para cada classe de recurso. Esses limites caracterizam áreas que atendem aos critérios geométricos do método de classificação e nas quais serão medidas as incertezas das estimativas, para só, então, efetivamente, enquadrar as tonelagens nas devidas categorias. Nas [Figuras 1](#) e [2](#), são apresentadas a localização dos furos de sondagem e as áreas definidas pelo critério geométrico do sistema de classificação.

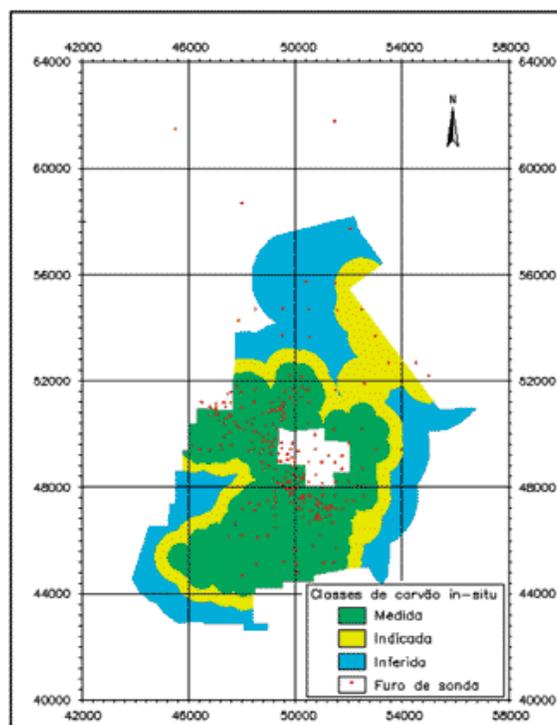


Figura 1 - Localização dos furos de sondagem com dados de espessura. As três áreas hachuradas correspondem às três classes de

carvão "in-situ", segundo os critérios de extrapolação máxima definidos pelo JORC (AusIMM, 1999).

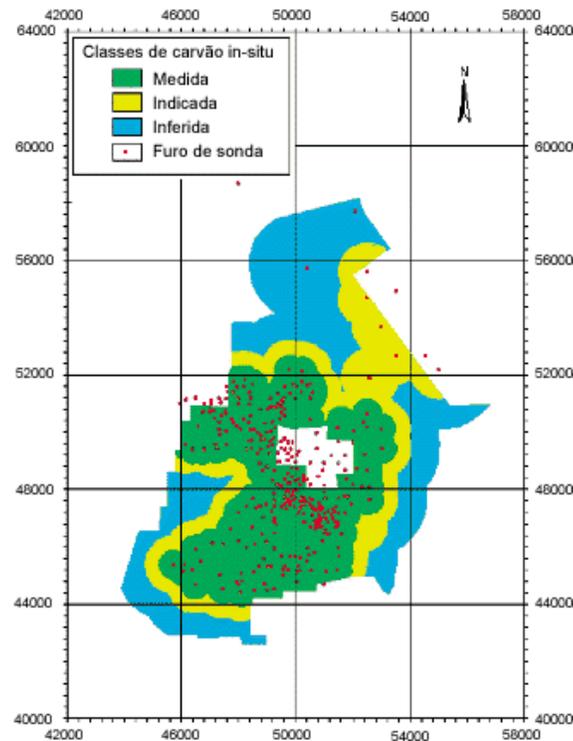


Figura 2 - Localização dos furos de sondagem com dados de densidade.

O tamanho de blocos escolhido, visando a uma boa discretização da área, foi de 35 x 35 m. A distribuição dos dados de sondagem foi adequada para esse tamanho de suporte de acordo com o método de correção afim com redução de 20% e 15% da variância original para densidade e espessura, respectivamente (Isaaks & Srivastava, 1989). Como os padrões de amostragem das campanhas não eram regulares, as informações foram desagrupadas para atenuar possíveis tendências oriundas do plano de amostragem inicial. A estatística básica desagrupada e com mudança de suporte para blocos das variáveis espessura e densidade é apresentada na [Figura 3](#).

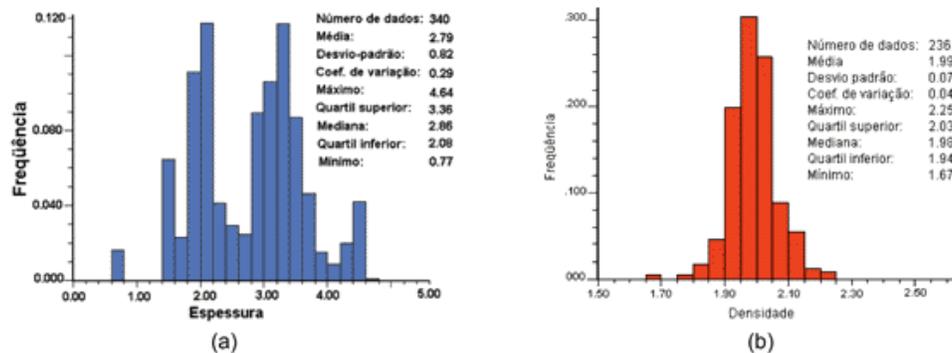


Figura 3 - Estatística básica dos dados desagrupados de espessura (a) e densidade (b).

Nas equações (1) e (2) e nas [Figuras 4 e 5](#), é mostrada a continuidade espacial das informações para os dados normalizados. Para isso, a distribuição dos dados originais é, primeiramente, transformada em uma distribuição gaussiana, hipótese requerida pelo método de simulação. Para a espessura, o fenômeno mostrou-se mais contínuo na direção N-S e, para a densidade, N135E.

$$\gamma(h) = 0,2 + \left[0,15 \cdot Sph_{(1)} \left[\frac{hN-S}{485\text{ m}}, \frac{hE-W}{476\text{ m}} \right] + 0,65 \cdot Sph_{(2)} \left[\frac{hN-S}{4500\text{ m}}, \frac{hE-W}{1978\text{ m}} \right] \right] \quad (1)$$

para espessura e

$$\gamma(h) = 0,05 + \left[0,5 \cdot Sph_{(1)} \left[\frac{hN135E}{410\text{ m}}, \frac{hN45E}{360\text{ m}} \right] + 0,45 \cdot Sph_{(2)} \left[\frac{hN135E}{2950\text{ m}}, \frac{hN45E}{2760\text{ m}} \right] \right] \quad (2)$$

para densidade.

Após a normalização dos bancos de dados, verificação da condição de multinormalidade e o estudo de continuidade espacial no espaço normal, aplicou-se o método de simulação seqüencial gaussiana. Foram geradas 50 realizações equiprováveis para cada bloco discretizado, de cada variável.

Antes de se prosseguir com o pós-processamento dos modelos e com o uso dos mesmos para estimar a incerteza no processo de cálculo de reservas, foi executada a validação das simulações geradas, para verificar a reprodutibilidade do variograma ([Figura 6](#)) e histograma ([Figura 7](#)), obtidos a partir dos dados condicionantes, evidenciando a eficiência dos modelos estocásticos na geração de representações equiprováveis do atributo modelado.

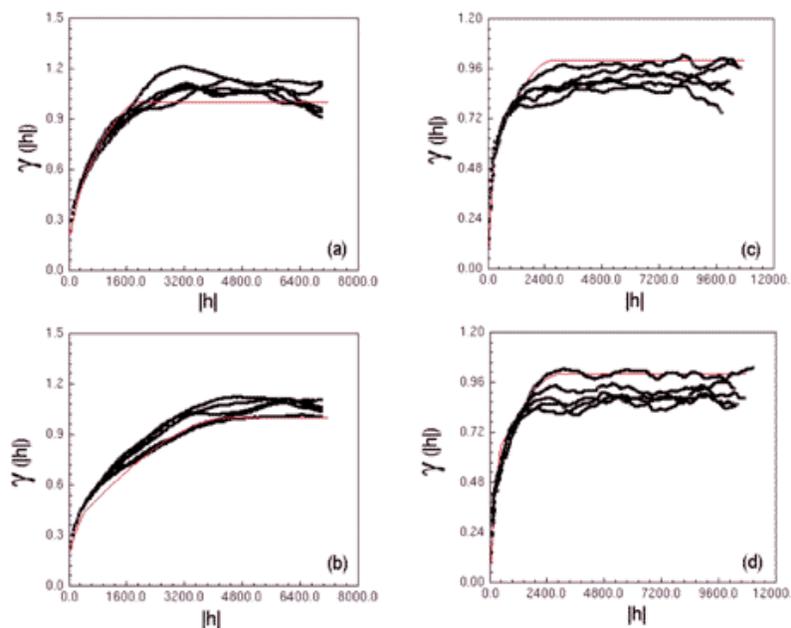


Figura 6 - Oscilações do variograma nas principais direções de menor (a e c) e maior (b e d) continuidade para espessura e densidade, respectivamente, no espaço normal para 5 realizações tomadas aleatoriamente. Em vermelho aparece o modelo variográfico utilizado.

Com as simulações geradas para as duas variáveis, são compostos os possíveis modelos para a variável de acumulação (t/m^2). Esses modelos são compostos pela escolha aleatória de uma realização no conjunto de 50 realizações geradas para a variável espessura multiplicada por uma realização no conjunto das realizações geradas para a variável densidade, também escolhida aleatoriamente. Para decidir o número de cenários

compostos, utilizou-se a variância das tonelagens globais, que oscila conforme aumentamos o número de modelos até atingir um patamar limite (Bonato, 2000). O número de cenários necessários seria aquele que garanta que esse patamar de variância tenha sido atingido ([Figura 8](#)).

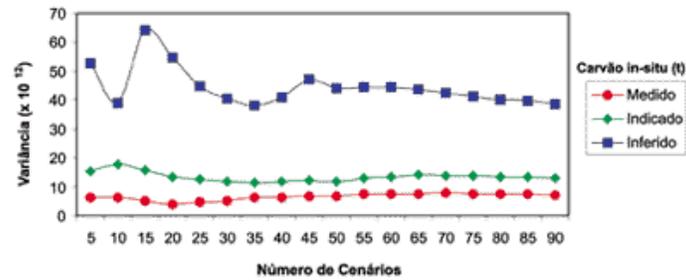


Figura 8 - Flutuação da incerteza ou variabilidade em função do número de cenários gerados.

Em cada cenário são mantidos somente os valores englobados pelos limites definidos pelos critérios geométricos e que definem as classes de recursos. O somatório dos valores de t/m^2 no interior de cada limite é multiplicado pelas áreas dos blocos, obtendo-se, assim, as tonelagens para cada cenário em cada uma das classes de recursos.

3. Discussão

Na [Figura 8](#), pode-se observar que a partir de 50 possíveis cenários, o intervalo de incerteza ou variabilidade representado pela variância entre os valores de tonelagens dos modelos torna-se constante para a classe de carvão "in-situ" inferido, enquanto que, para as classes de carvão "in-situ" indicado e medido, 25 a 30 cenários já seriam suficientes. Portanto considera-se que a incerteza sobre esse parâmetro foi caracterizada, não trazendo mais alterações sobre a variância a adição de novos modelos.

De posse do grupo de possíveis cenários, para cada classe de recurso, resta determinar se a flutuação dos mesmos não excede os limites de variabilidade impostos pelo sistema de classificação. Como a metodologia apresentada fornece a distribuição (forma, espalhamento, etc.) dos valores de tonelagens, essa variabilidade é facilmente calculada pela diferença percentual entre os valores mínimos e máximos em relação à média.

A [Figura 9](#) apresenta a distribuição para as três classes de carvão in-situ de 50 cenários equiprováveis e a [Tabela 02](#) sumariza os resultados obtidos.

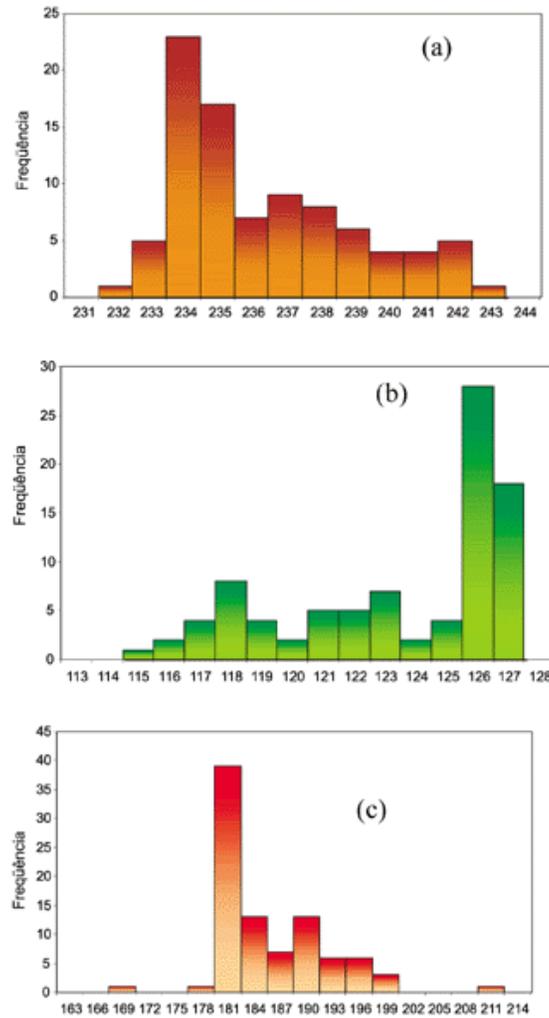


Figura 9. Histogramas de carvão "in-situ" ($\times 10^6$ toneladas) para as classes (a) medida, (b) indicada e (c) inferida.

Tabela 02 - Variação em relação à média para as classes de carvão in-situ.

Classe	Média (t)	Variação (%)	
		Negativa	Positiva
Medida	235.861.708,90	1,86	2,77
Indicada	122.986.512,50	7,08	3,22
Inferida	184.328.708,30	9,87	13,08

A [Tabela 02](#) salienta que os intervalos de incerteza não são simétricos em torno da média, o que, de forma inapropriada, é assumido quando a variância de krigagem é utilizada como medida da incerteza. Destaca-se, também, o aumento da incerteza, conforme a classe muda de medida para inferida, associado diretamente à diminuição da densidade amostral.

4. Conclusões

Além de permitir acessar a incerteza na classificação dos recursos de maneira confiável, na medida em que permite garantir que toda a variabilidade seja mapeada, esse método apresenta a real distribuição do erro, não assumindo, como é feito nos métodos que utilizam a variância de krigagem, uma distribuição simétrica do erro ao redor da média.

Esse trabalho propõe uma metodologia capaz de indicar o erro em relação à média no cálculo de recursos minerais com base em simulação geoestatística. Constatou-se que com a utilização de n estimativas equiprováveis, pode-se calcular índices de incerteza para estimativas de recursos, além de permitir compreender a variabilidade e correlação espacial num dado depósito.

As estimativas foram consideradas coerentes, na medida em que a escala de valores absolutos foi próxima às obtidas em estudos anteriores elaborados por krigagem ordinária, com a vantagem de permitir acessar a incerteza de uma forma mais direta, robusta e com embasamento teórico.

5. Referências Bibliográficas

AusIMM. **Australasian code for reporting of mineral resources and ore reserves (JORC Code) - AusIMM**. Sidney, September 1999. 16 p. [[Links](#)]

BONATO, F.S. **Planejamento de lavra com auxílio de simulação geoestatística**, Porto Alegre: PPGEM/UFRGS, 2000. 87 p. (Dissertação de Mestrado). [[Links](#)]

CAMISANI-CALZOLARI, F.A. Report back on the attendance to the Joint CMMI UN task force meetings on resource/reserve definitions. Geneva, 3-6 October 1998. **SAIMM Internal Report**, 12 p. [[Links](#)]

DEUTSCH, C.V., JOURNEL, A.G. 1998. GSLIB: **Geostatistical software library and user's guide**, New York: Oxford University Press, 1998. 369 p. [[Links](#)]

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**, New York: Oxford University Press, 1997. 483 p. [[Links](#)]

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M.R. **An introduction to applied geostatistics**, New York: Oxford University Press, 1989. 561 p. [[Links](#)]

YAMAMOTO, J.K. **Comparação de métodos computacionais para avaliação de reservas: um estudo de caso na jazida de cobre de Chapada, GO**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1991. 175 p. (Tese de Doutorado). [[Links](#)]

Artigo recebido em 24/05/2001.



Todo o conteúdo do periódico, exceto onde está identificado, está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#)

Escola de Minas

Praça Tiradentes, 20
35400-000 Ouro Preto MG - Brazil
Tel: (55 31) 3551-4730



editor@rem.com.br