

0920449

O ERRO GEOMÉTRICO RELATIVO NA AVALIAÇÃO DE RESERVAS: ESTUDO DE CASO DO MINÉRIO RESIDUAL DE FOSFATO DE ANITÁPOLIS - SC

Roberto Hisayoshi SAMESHIMA*

Jorge Kazuo YAMAMOTO**

- RESUMO: Este trabalho apresenta o estudo do problema do erro geométrico cometido na avaliação de reservas de um depósito mineral. O erro geométrico é dado pela diferença entre o volume de minério existente nos limites da mineralização e o volume estimado nos limites interpretados e calculados por algum método de avaliação. Assim, devido à impossibilidade de cálculo do erro geométrico real, pode-se determinar o erro geométrico relativo, dado pela diferença para um método padrão. O método padrão considerado foi aquele dos perfis padrão, pois, além de permitir o cálculo exato do volume do corpo de minério, apresenta a vantagem de permitir a interpretação geológica das seções mineralizadas.
- PALAVRAS-CHAVE: Avaliação de jazidas; erro geométrico; minério residual; Complexo Alcalino de Anitápolis.

Introdução

Os métodos existentes para avaliação de reservas procuram, segundo os seus princípios de interpretação, analisar e avaliar tecnicamente os resultados obtidos durante a fase de pesquisa mineral, visando à quantificação e qualificação do depósito mineral.

Os métodos de avaliação de reservas existentes são: clássicos, de ponderação pelo inverso da potência da distância e de krigagem ordinária. No grupo dos métodos clássicos são considerados todos os métodos revistos por Popoff,⁵ bem como as atualizações, de alguns métodos, realizadas por Annels.¹ Os métodos deste grupo tendem a analisar o depósito mineral, por meio de uma aproximação por figuras geométricas, segundo os princípios de interpretação (mudanças graduais, pontos mais próximos e generalização), formando grandes blocos de cubagem, geralmente prismas e pirâmides. Em especial, os métodos dos perfis apresentam bons resultados na avaliação

* Pós-Graduando do Instituto de Geociências - USP - 05508-900 - São Paulo - SP.

** Departamento de Geologia Econômica - Instituto de Geociências - USP - 05508-900 - São Paulo - SP.

de volumes, segundo estudos de aferição de volumes, realizados por Sameshima & Yamamoto.⁶ Os teores destes blocos de cubagem são calculados como média ponderada dos furos, pela espessura ou área, que se encontram neles. Os métodos do inverso da potência da distância e de krigagem ordinária são baseados na subdivisão do depósito mineral em blocos de cubagem de tamanhos predefinidos, geralmente na forma de paralelepípedos, cujas dimensões são determinadas em razão da malha de amostragem e de parâmetros do variograma. A estes blocos de cubagem são atribuídos valores de teores, calculados pela equação da média ponderada, cujos ponderadores podem ser inversamente proporcionais ao inverso da potência da distância ou então iguais àqueles que garantem variância mínima de krigagem para uma dada configuração de pontos de amostragem e bloco.

Como pôde ser observado, existem basicamente dois grupos de métodos de avaliação de reservas: aqueles que determinam as reservas em blocos de cubagem definidos segundo a geometria dos pontos de amostragem (polígonos, triângulos, perfis etc.), que são agrupados como métodos clássicos, e outros que determinam as reservas em blocos de cubagem, na forma de paralelepípedos, que independem da geometria dos pontos de amostragem. Portanto, como é de esperar, a aplicação desses métodos irá resultar em valores diferentes de volumes e teores e, conseqüentemente, nas reservas determinadas. Qualquer que seja o método empregado, sempre haverá uma incerteza no cálculo de suas reservas, embora os métodos clássicos possam melhor avaliar os volumes dos depósitos, a análise dos teores em pontos não amostrados fica prejudicada com a extensão para todo o bloco de um teor médio; enquanto os métodos baseados na subdivisão do depósito em paralelepípedos estimam melhor os teores, porém com uma deficiência no cálculo real de volumes, devido à aproximação da forma do depósito por meio de um conjunto de paralelepípedos.

Qualquer que seja o método aplicado, a reserva do depósito será determinada, havendo uma incerteza associada aos limites reais da mineralização, que foram aproximados ou por interpretação geológica e/ou por um conjunto de paralelepípedos. Entretanto, o volume real do depósito somente será conhecido no fim da vida útil da jazida. A diferença entre os volumes computados por qualquer método de avaliação e o volume real do depósito é denominado erro geométrico.

O presente trabalho faz uma análise do erro geométrico relativo para o depósito de minério residual de fosfato do Complexo Alcalino de Anitápolis – SC.

Emprega-se um método não-convencional para avaliação de reservas, porém muito utilizado para o cálculo de volumes de superfícies topográficas, que são os Modelos Digitais de Superfícies (MDSs). A partir dos MDS os volumes podem ser obtidos pela diferença entre dois MDSs (topo e base) ou pela diferença entre um MDS e um plano *datum*.

Colocação do problema

O erro geométrico consiste na diferença entre o volume de minério existente nos limites da mineralização e o volume estimado por algum método de avaliação.

Este volume estimado é baseado nas informações dos trabalhos de pesquisa realizados sobre o depósito mineral.

Nos métodos clássicos, este erro, segundo Matheron,³ pode ser de duas formas: um denominado erro de borda e o outro, erro de terminação. O erro de borda ocorre, segundo aquele autor, quando se calcula o volume de um depósito ou parte dele por meio do produto de uma área média ou altura média por uma espessura ou área, respectivamente. Por exemplo, na interpretação de uma seção definida pelos furos de sondagem esta interpretação pode ser a não-correta, como ilustra a Figura 1. O erro de terminação é cometido nas extremidades do depósito mineral, como por exemplo, no cálculo de reservas pelos métodos dos perfis (padrão e linear) em que as seções utilizadas para a definição dos blocos de cubagem são estendidas até uma distância de influência, no caso de cálculo da reserva indicada, conforme DNPM,² esta seria calculada como uma extensão do depósito baseada nas seções-limites. Esta extensão pode ser de três formas:

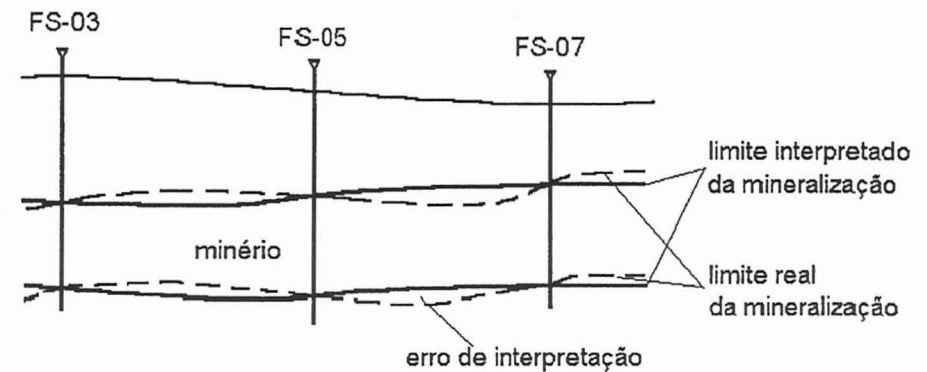


FIGURA 1 – O problema da interpretação dos limites no corpo de minério.

a) aplicando-se a meia distância entre as seções adjacentes, método dos perfis lineares (Figura 2A):

$$V = S \frac{L}{2}$$

b) supondo a continuidade do depósito em forma de cunha, perfis padrão utilizando-se a fórmula da área média (Figura 2B):

$$V = S \frac{L}{2}$$

c) ou supondo a continuidade em forma de uma figura cônica, perfis padrão utilizando-se a fórmula do tronco de cone (Figura 2C):

$$V = \frac{S}{3} L$$

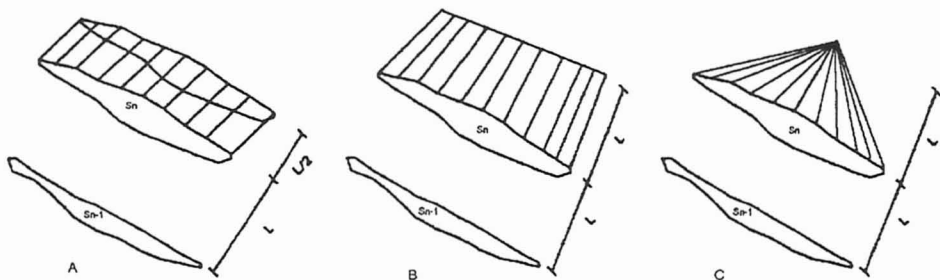


FIGURA 2 – Blocos de cubagem de diferentes formas para a terminação de um corpo de minério.

Nos métodos da média ponderada, que subdividem o depósito em blocos de dimensões compatíveis com a malha de amostragem e parâmetros do variograma, o volume é estimado como a somatória dos n blocos positivos. Os blocos são considerados positivos caso os seus centros geométricos se encontrem dentro dos limites da mineralização (Figura 3). Esta figura ilustra esquematicamente o erro geométrico dado pela diferença entre o volume real e o computado. O problema do erro geométrico não se restringe somente à superfície, estendendo-se também para a profundidade (Figura 4), pois, além dos problemas de separação dos blocos de minério dos demais sem interesse, ocorre o efeito de compensação dado pela exclusão de partes de minério e inclusão de partes do estéril.

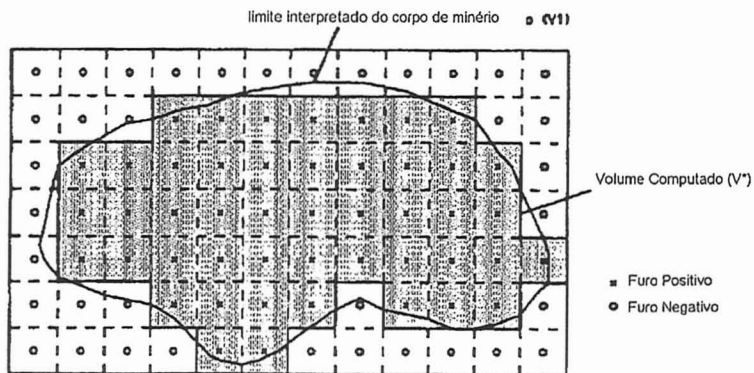


FIGURA 3 – Diferença entre o limite interpretado do corpo de minério (V) e o limite a ser computado (V*).

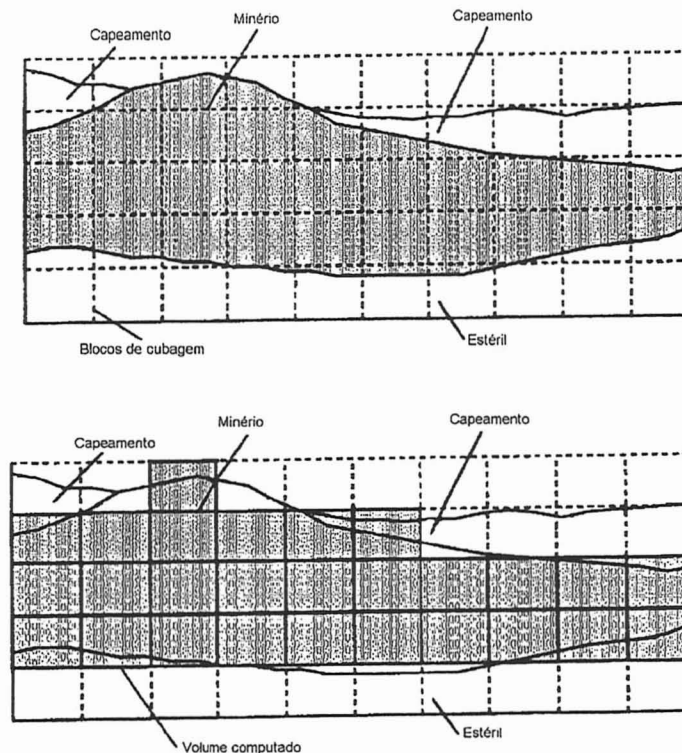


FIGURA 4 – Perfil de uma camada de minério (acima) e os problemas da separação de minério do estéril (abaixo).

No caso da avaliação pelos métodos da média ponderada, estes problemas poderiam ser facilmente resolvidos caso se pudesse diminuir o tamanho do bloco de cubagem indefinidamente. Porém, o tamanho do bloco é limitado pela malha de pesquisa, ou seja, para que a interpolação do teor no bloco seja possível, é necessário que haja um número suficiente de informações dentro de uma distância do centro do bloco. Esta distância máxima é definida em razão do tamanho do bloco, sendo geralmente igual a 2 vezes o lado maior do bloco, pois, para distâncias maiores, as amostras pouco ou nada contribuirão para a efetiva avaliação do bloco. Observe-se, na Figura 5, como a diminuição do tamanho do bloco limita a quantidade de informações para a interpolação do teor no bloco.

O erro geométrico relativo no cálculo de reservas do minério residual de fosfato do complexo alcalino de Anitápolis – SC

Para fins do presente estudo, foram considerados 46 furos de sondagem, cuja localização é mostrada no mapa da Figura 6, para o cálculo de reservas do minério residual de fosfato do Complexo Alcalino de Anitápolis – SC, e avaliação do erro geométrico.

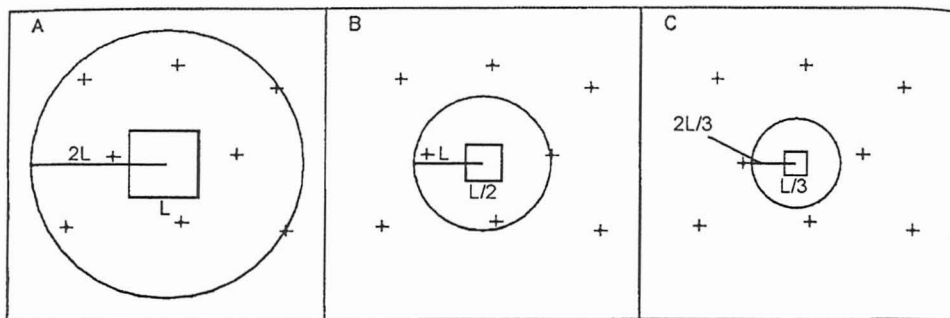


FIGURA 5 - As limitações dos tamanhos de blocos para um mesmo conjunto de amostras, usando uma distância máxima igual a duas vezes o lado do bloco: 8 pontos para o bloco de lado L (A), com 3 pontos para o bloco de lado L/2 (B) e sem nenhum ponto para o bloco de lado L/3 (C).

O erro geométrico no cálculo das reservas do minério residual

A avaliação do erro geométrico para a reserva do minério residual foi efetuada com a aplicação dos métodos dos perfis, da média ponderada e modelo digital de superfície, com base nos testes de aferição de volumes realizados por Sameshima & Yamamoto.⁶

Para o cálculo das reservas de minério, foi considerada densidade de 2,0 t/m³, de acordo com Vergara.⁸ Os teores globais da jazida foram calculados para cada um dos métodos utilizados.

Cálculo de reservas pelo método dos perfis

O depósito de minério residual foi cubado pelos métodos dos perfis padrão e lineares. A confecção das seções foi baseada na disposição dos furos de sondagem que estão distribuídos dentro de uma malha regular de 200 x 200 m. Foram confeccionadas sete seções paralelas, espaçadas de 200 m e com orientação E-W. A Figura 7 mostra a disposição das seções e os furos de sondagem utilizados em cada seção; na Figura 8 são apresentadas as seções com a delimitação do minério residual pela interpretação geológica.

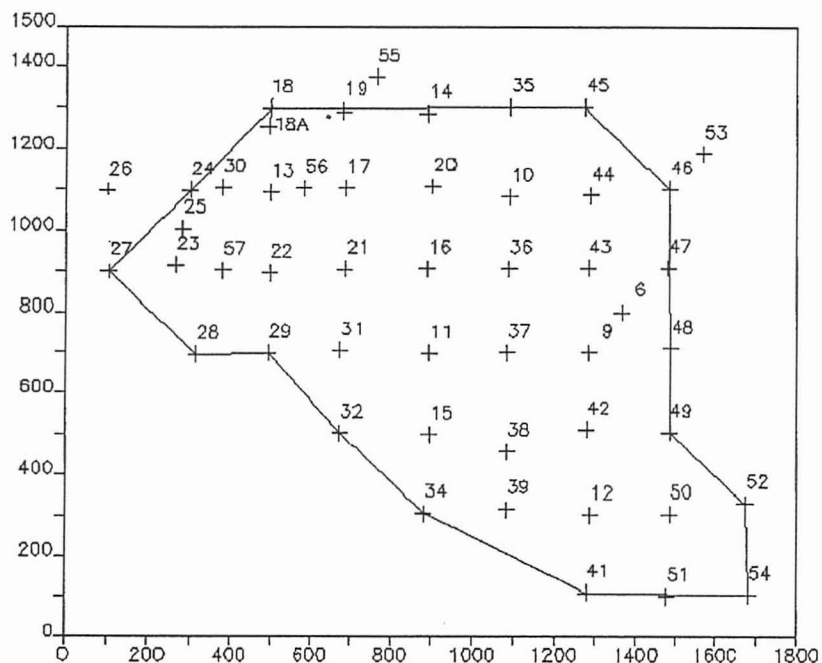


FIGURA 6 - Mapa de localização dos 46 furos de sondagem no novo sistema de coordenadas e a delimitação da área considerada para a avaliação de reservas.

A definição da área de interesse do depósito foi feita com base no relatório da Paulo Abib Engenharia (PAA⁴) e no trabalho de Vergara.⁸

A avaliação deste depósito mineral para a área de interesse enquadra-se como reserva medida, conforme a classificação de reservas adotada por DNPM.²

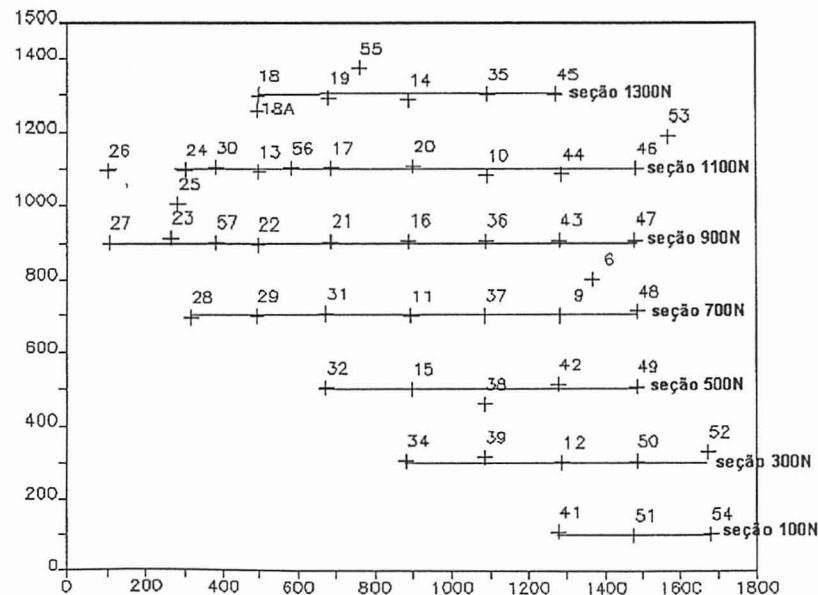


FIGURA 7 - Mapa de localização das seções geológicas.

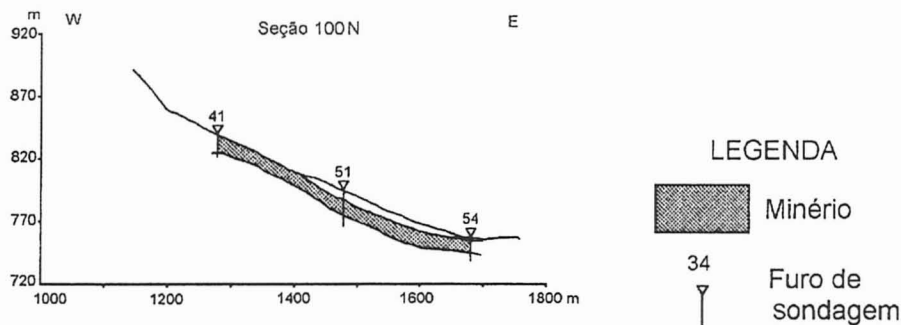


FIGURA 8 - Seção geológica com a interpretação da camada de minério.

Para cada seção geológica foram calculados os teores médios pela média ponderada pela espessura. O teor global do depósito, utilizado pelo método dos perfis, foi obtido pela média ponderada pela área da seção. A Tabela 1 apresenta os valores da área mineralizada de cada seção e o respectivo teor médio.

Tabela 1 - Valores das áreas mineralizadas e os respectivos teores

Seção	Área (10^3 m^2)	Teor médio (%)	Teor global (%)
100N	5,05	6,42	
300N	10,11	6,91	
500N	18,56	6,34	
700N	31,13	10,13	8,46
900N	41,28	8,66	
1.100N	25,68	7,53	
1.100N	17,08	10,17	

No método dos perfis padrão, os volumes foram calculados por meio da fórmula do tronco de cone. A Tabela 2 apresenta os resultados das reservas e os volumes obtidos, com a utilização do método dos perfis.

Tabela 2 - Resultados dos volumes e reservas pelos métodos dos perfis

Perfis		Perfis lineares	
Volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Reserva ($\times 10^6 \text{ t de P2O5}$)	Volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Reserva ($\times 10^6 \text{ t de P2O5}$)
27,33	4,624	27,57	4,665

Cálculo de reserva pelos métodos da média ponderada

O cálculo de reservas pelos métodos da média ponderada foi realizado pelo método do inverso da potência da distância. Para este fim, o depósito de minério residual foi dividido em blocos de tamanho $100 \times 100 \times 10$. O dimensionamento dos blocos foi efetuado em razão da distância dos furos de sondagem, pois os teores dos blocos devem ser estimados por amostras situadas a uma distância não superior a 2 vezes o lado do bloco. Portanto, o lado do bloco, igual a 100 m, é metade da malha de amostragem de 200×200 m.

Esta divisão do depósito resultou em 287 blocos de cubagem, os quais foram considerados positivos, desde que possuíssem os seus centros geométricos dentro dos limites da mineralização. A Figura 9 mostra um desenho esquemático do depósito do minério residual subdividido em blocos.

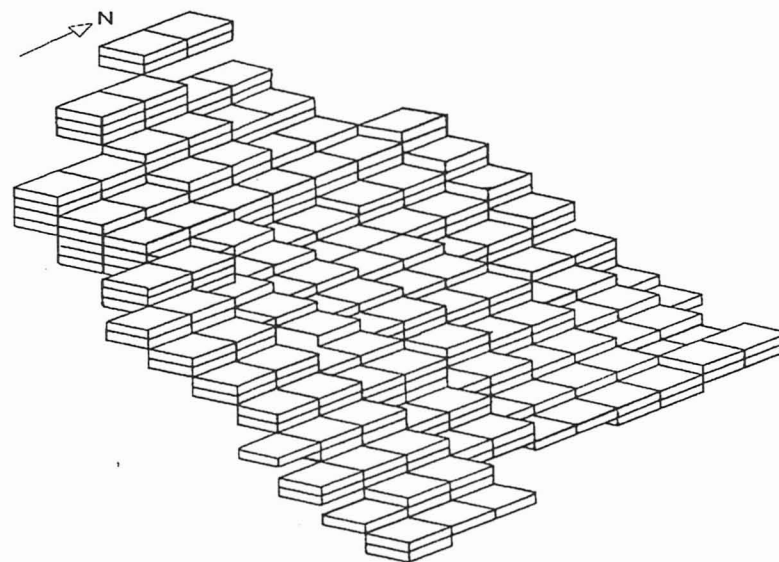


FIGURA 9 - Depósito de minério residual com a divisão em blocos de avaliação para os métodos da média ponderada.

É importante salientar que, para o caso de cálculo de reservas pelos métodos da média ponderada, os volumes serão exatamente iguais, pois o critério de seleção de bloco é único, diferindo nos teores que podem ser determinados pelo inverso da potência da distância (IPD) ou pela krigagem ordinária. Para este estudo, foi escolhido o IPD, pois os variogramas experimentais obtidos por Valente⁷ não foram considerados significativos. A Tabela 3 apresenta os valores de reserva obtida pelo IPD.

Tabela 3 – Valor da reserva obtida pelo IPD

Método da média ponderada	Teor global (%)	Volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Reserva ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
	8,67	28,70	4,97

Cálculo de reservas pelo MDS

O cálculo de reservas pelo MDS foi realizado a partir da confecção de três MDSs, sendo dois para a definição do topo e base do minério e um para a definição das espessuras do minério de acordo com os furos de sondagem.

Para a confecção destes MDSs foram utilizados os dados dos 46 furos de sondagem existentes dentro da área de interesse (Figura 6). O método de interpolação para a construção do MDS foi a triangulação, pois é o método que melhor representa uma superfície topográfica.

O teor global considerado para este método foi o teor obtido pela média ponderada por todos os furos, resultando-se em um valor igual a 8,26% de P_2O_5 .

O cálculo de reservas por meio dos MDSs é feito determinando-se para cada célula, definida por quatro nós contíguos da malha regular de um MDS, o volume do prisma delimitado na célula, seja pela diferença entre dois MDSs ou entre um MDS e um plano *datum*. O volume total é o somatório dos volumes de cada célula.

Na Figura 10 são observados os dois MDSs confeccionados para o topo e base, e os resultados dos volumes obtidos com a diferença entre os MDS topo e base e o volume do MDS da espessura em relação a um plano *datum* igual a zero foram os mesmos. A Tabela 4 apresenta o valor da reserva obtida por este método.

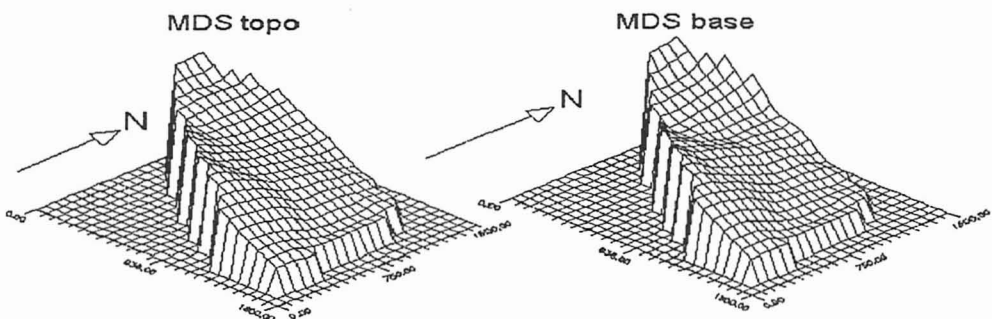


FIGURA 10 – Vista dos dois MDSs utilizados para o cálculo de reservas.

Tabela 4 – Resultado da reserva obtida pelo método do MDS

Volume entre MDSs ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Teor global (%)	Reserva ($\times 10^6 \text{ t de P}_2\text{O}_5$)
23,43	8,26	3,87

Análise dos resultados

A comparação dos resultados obtidos para a reserva de minério residual de fosfato pela aplicação dos métodos citados mostra que há uma variação entre os valores de reservas e volumes da ordem de até 20% de um método para outro.

Os cálculos efetuados pelo método IPD apresentou a maior reserva, enquanto as reservas calculadas pelo método dos MDSs foram as menores. Os valores das reservas fornecidos pelos métodos dos perfis padrão e lineares não tiveram grande variação entre si, ficando entre os valores obtidos pelos dois métodos anteriores. A Tabela 5 apresenta os valores das reservas e volumes calculados por todos os métodos.

Tabela 5 – Resultado da reserva obtida pelos métodos empregados

Método	Volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Reserva ($\times 10^6 \text{ t de P}_2\text{O}_5$)
Perfis padrão	27,33	4,62
Perfis lineares	27,56	4,67
MDS	23,43	4,97
IPD	28,70	3,87

Estes valores extremos são decorrentes do modo de obtenção dos volumes dos métodos empregados, pois são calculados a partir de figuras geométricas, paralelogramos e planos de triângulos, enquanto os volumes obtidos pelos métodos dos perfis são influenciados por uma interpretação geológica na delimitação do corpo de minério dentro de cada seção.

Observe-se, na Figura 11, uma seção onde a camada de minério é definida geologicamente e os planos de interpolação dos triângulos que delimitam o minério pelo método do MDS.

Neste caso, apesar de o MDS por triangulação ser o melhor método para a interpolação de superfícies, a falta de maiores informações acabou prejudicando os resultados, como se pode verificar na figura anterior, o MDS abrangeu parte do "ar" e excluiu porções mineralizadas.

A menor reserva fornecida pelo MDS foi devida à construção dos planos de triângulos em pontos muito distantes, onde ocorreu uma exclusão muito maior de minério que a inclusão de partes de estéril.

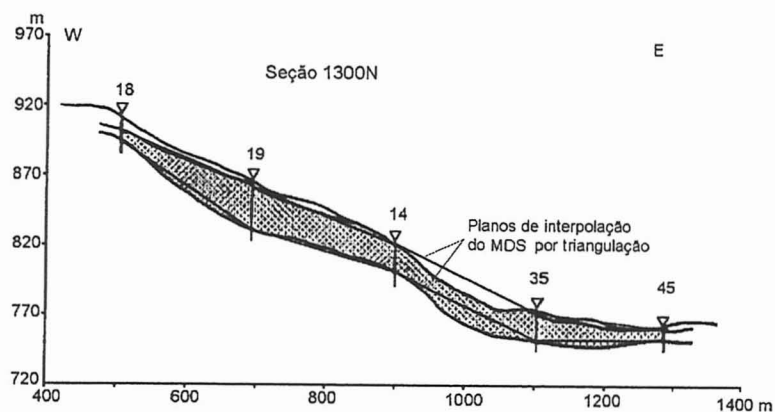


FIGURA 11 – Seção mostrando as diferenças de cálculo de reserva pelos métodos dos perfis e por MDS.

A subdivisão do depósito mineral em blocos proporcionou uma reserva maior em relação aos demais métodos. A Figura 12 mostra uma seção com a camada de minério e os blocos de cubagem que foram utilizados para o cálculo de reservas para os métodos da média ponderada.

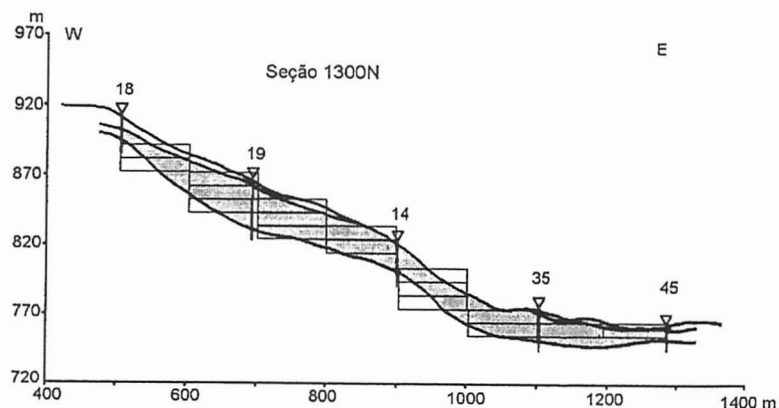


FIGURA 12 – Seção mostrando uma camada de minério definida pelo método dos perfis e os blocos de cubagem utilizados pelos métodos da média ponderada.

Como é possível observar nesta figura, a divisão por blocos de cubagem elimina reservas com porções mineralizadas e considera porções de estéril no cálculo de reservas, o chamado efeito de compensação. Neste caso, as reservas cubadas pelos métodos da média ponderada compensaram muito mais partes de estéril do que minério.

Conforme pode ser verificado, os valores de reservas obtidos pelos métodos dos perfis apresentaram os resultados, aqui considerados, mais satisfatórios. O método dos perfis padrão, utilizando a fórmula do tronco de cone, pode ser considerado o que apresentou um menor erro geométrico.

Considerações finais

Considerando o método dos perfis padrão como aquele que proporcionou um resultado satisfatório, dentro da limitação das informações, pode-se calcular o erro geométrico em relação a este como:

$$EG = \frac{RM - RPP}{RPP} \times 100(\%)$$

onde RM é a reserva por um outro método e RPP é a reserva pelo método dos perfis padrão.

Os resultados dos erros geométricos, assim calculados, encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Erro geométrico estimado para os diferentes métodos de cálculo de reservas em relação ao método dos perfis padrão

Método	Erro geométrico (%)
Perfis lineares	0,89
MDS	-16,31
Computacional	7,48

A reserva calculada a partir de Modelos Digitais de Superfícies é subestimada em 16,31%, enquanto a reserva determinada por blocos de cubagem dos métodos da média ponderada superestima em 7,48%.

O método dos perfis padrão é, sem dúvida, o que proporciona o menor desvio no cálculo de volumes e, conseqüentemente, de erro geométrico. Além disso, o método dos perfis permite a interpretação geológica das seções, de suma importância para o cálculo de reservas.

Os métodos da média ponderada, por meio da subdivisão em blocos de cubagem de dimensões compatíveis com os dados de amostragem, sempre resultarão em reservas superestimadas, como pôde ser verificado neste trabalho.

Por outro lado, as reservas calculadas por MDS mostram valores mínimos de volumes e sem nenhuma interpretação geológica. Estes resultados poderiam ser utilizados para uma estimativa muito conservadora de reservas.

SAMESHIMA, R. S., YAMAMOTO, J. K. The geometric error in the evaluation of ore reserves: case study of the residual phosphate deposit of Anitápolis – SC. *Geociências (São Paulo)*, v.15, n.1, p.93-106, 1996.

- **ABSTRACT:** *This paper presents the study to the problem of geometric error, which occurs with ore reserve estimation of mineral deposits. The geometric error is given by the difference between the volume of ore in the actual boundaries of mineralization and the volume estimated in the interpreted boundaries of ore, computed by some method of evaluation. Thus, due to the impossibility for determination of actual geometric error, the relative geometric error could be computed given by the difference to a standard method. The standard method was considered to be the standard sections, because this method allows the accurate determination of the volume of ore body and the geological interpretation of mineralized sections.*
- **KEYWORDS:** *Reserve estimation; geometric error; residual ore; Alkaline Complex of Anitapolis.*

Referências bibliográficas

- 1 ANNELS, A. E. *Mineral deposit evaluation: a practical approach*. London: Chapman & Hall, 1991. 436p.
- 2 DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. *Código de Mineração e Legislação Correlativa*. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Fomento da Produção Mineral, 1987. 333p.
- 3 MATHERON, G. *Traité de géostatistique appliquée*. Bureau de Recherches Géologique et Minières, v.14, tome I e II, 1962. 357p.
- 4 PAA – PAULO ABIB ENGENHARIA. *Estudo da tipologia do minério de fosfato, Anitápolis, Santa Catarina*. São Paulo, 1979. (Relatório inédito).
- 5 POPOFF, C. C. *Computing reserves of mineral deposits: principles and conventional methods*. Washington: Bureau of Mines, 1966. 133p. (IC8283).
- 6 SAMESHIMA, R. H., YAMAMOTO, J. K. Aferição de volumes pelos métodos dos perfis padrão e lineares. In: SIMPÓSIO SOBRE QUANTIFICAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS, 6, 1995. Rio Claro. *Boletim de Resumos Expandidos...* Rio Claro: UNESP. 1995, p.153-7.
- 7 VALENTE, J. Avaliação geoestatística com parametrização da jazida fosfática de Anitápolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Camboriú. *Anais...* Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia, 1980. v.2, p.1243-57.
- 8 VERGARA, V. D. Pesquisa geológica desenvolvida no Complexo Alcalino de Anitápolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Camboriú. *Anais...* Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia, 1980. v.4, p.2502-17.