

UMA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A MODELAGEM DE CAMADAS DE TOPO E BASE EM SUPERFÍCIES DELGADAS

Victor Miguel Silva^{1}*

RESUMO

SILVA, MV.M. Uma proposta metodológica para a modelagem de camadas de topo e base em superfícies delgadas. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharias**, v. 7, n.19, p.01-09, 2017.

Feições naturais como topografia de um terreno ou horizontes pedológicos são tipicamente representados computacionalmente por um ou mais modelos digitais de superfícies relativo aos seus limites ou subdivisões, o que possibilita sua visualização ou cálculos volumétricos. Devido aos principais softwares com essas aplicações serem voltados a aplicações à cartografia, não contem ferramentas que lidam corretamente com modelos formados por camadas verticalmente sequenciais, o que pode levar a inconsistências como interseções indesejadas e posições espaciais invertidas, causando relações não realistas e análises volumétricas incorretas. Como forma de garantir a reprodução da relação estratigráfica

entre as camadas, o presente trabalho propõe uma solução metodológica baseada não mais na interpolação das cotas de cada superfície, mas na estimativa de suas espessuras e relações relativas entre suas camadas. A metodologia é ilustrada através da modelagem de um corpo bauxítico (minério de alumínio) lenticular, uma situação típica onde os principais algoritmos de interpolação não honram o comportamento real em que suas camadas não devem se cruzar. A comparação volumétrica e visual demonstrou que o emprego do método proposto gerou resultados mais adequados que as soluções clássicas, reproduzindo de forma adequada a relação espacial esperada.

Palavras-chave: MDS; Modelagem Geológica; Bauxita.

ABSTRACT

Natural features as landscape topography or pedological horizons are typically represented computationally by one or more surface digital models relative to their boundaries or internal divisions, enabling digital visualization or volumetric calculations. Due to the main software with these applications does not offer tools that deal correctly with models formed by vertically sequential layers, which can lead to inconsistencies such as undesirable intersections and inverted spatial positions, causing unrealistic relations and incorrect volumetric analysis. As a way of assure the reproduction of the stratigraphic relationship between layers, this work proposes a

novel methodological solution based no more on the interpolation of the dimensions of each surface, but on the layer thickness estimation of each layer and their relations position. The methodology is illustrated by modeling a lenticular bauxite ore body (aluminum ore), a typical situation where the main interpolation algorithms do not honor the actual behavior in which their layers do not cross. The volumetric and visual comparison showed that the use of the proposed method generated better results than the classical solutions, reproducing properly the expected spatial relationship.

Keywords: DSM; Geological Modelling; Bauxite.

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Av. Paulo Gama, 110, Farroupilhas, Porto, RS, CEP: 90040-060, Brasil.

(*)e-mail: victormiguelsilva@hotmail.com

Data de chegada: 09/10/2015 Aceito para publicação: 01/11/2017

1. INTRODUÇÃO

Segundo Felgueiras (1998), um modelo digital de superfície (MDS) é uma representação matemática contínua de um fenômeno espacial. Dados do relevo, geologia ou levantamentos de dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de superfícies representados por um MDS, onde o conjunto de pontos georreferenciados é convertido em uma superfície contínua através de equações analíticas, ou então, pela interpolação das informações disponíveis para posições onde não existam medidas diretas.

Há situações onde a feição de interesse é representada por uma série de superfícies verticalmente muito próximas, e que as relações a serem estudadas não estão apenas na variação espacial de um único valor de interesse (como a elevação do terreno), mas tanto na variação relativa quanto na absoluta entre essas diferentes superfícies ou camadas. Nestas condições, é fundamental que a geração da superfície seja capaz de honrar as relações físicas que condicionem a relação entre elas, como superfícies que nunca se cruzam ou posições fixas de topo e base, já que a violação dessas relações pode afetar a qualidade das análises baseadas nestas informações.

Frente a necessidade da correta definição de camadas semiparalelas, e visto a restrita quantidade de softwares que executem de forma nativa e automática esta tarefa, o objetivo do presente trabalho é apresentar uma metodologia em que a geração simultânea de superfícies de topo e base sejam condicionadas pela manutenção da relação imposta pelo usuário através de um tratamento matemático anterior ao processo de interpolação, e que é aplicável na maioria dos softwares disponíveis, o que possibilita lidar de forma correta de horizontes pedológicos, estratos geológicos ou topo e base de intervalos de solo contaminados, dentre vários outros.

O método proposto é ilustrado através da modelagem de um horizonte laterítico de bauxita (minério de alumínio) na região das cidades de Mirai e Muriaé, estado de Minas Gerais. No estudo de caso, o método apresentado é utilizado para garantir a manutenção da relação de ordem entre os limites superiores e inferiores da mineralização, respectivamente, o contato com a camada de solo orgânico e o substrato rochoso. Como forma de comparação e referência, a modelagem também é executada através das rotinas típicas de interpolação da elevação disponíveis nos softwares, utilizando o quadrado e cubo do inverso da distância e por Krigagem Ordinária (MATHERON, 1963).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dados utilizados

O depósito de bauxita de Mirai está geograficamente localizado no sudeste de Minas Gerais (Figura 1). Também chamado cinturão aluminoso da Zona da Mata Mineiro é um dos maiores depósitos de bauxita do Brasil (ROMANO E CASTANEDA, 2006). O depósito é formado por mais de 1500 corpos tabulares, com suas áreas variando entre 50 a 200.000 m², dispersos entre as cotas 600 e 800 m de topos e encostas de serras do tipo “meia-laranja” ao longo de 150 km na direção SW-NE, desde a cidade de São João Nepomuceno até a cidade de Manhuaçu e o Sul do estado do Espírito Santo.

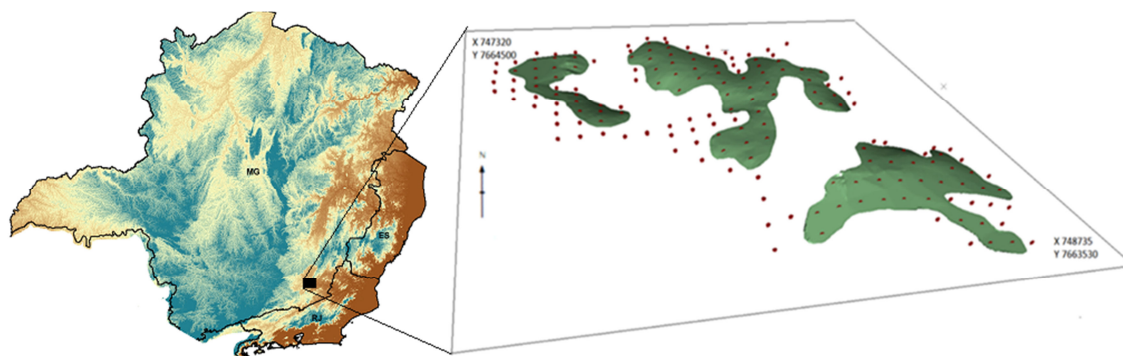


Figura 1 – Mapa Altimétrico (maior altitude nas cores quentes) dos estados de MG, RJ e ES e em detalhe, a organização de três corpos de minério e seus furos de sondagem. (Figura alterada de: EMBRAPA. Alterado de <http://www.cppse.embrapa.br/zoneamentos/imagens/Altimetria3.jpg> Visitado em 12/08/2015).

Localmente, a seção tipo do depósito é dada por uma camada superficial de solo orgânico com espessura de 0,30 m, seguida pela camada mineralizada, a qual tem espessura variando entre 0,5 e 9 m (média de 3,5 m) e limitada na base pelo nível saprolítico e/ou rocha fresca. Devido ao processo erosivo típico, a relação vertical entre solo, saprolito e rocha fresca, quando na presença das três, é fixa, não havendo inversões ou mudanças na organização vertical descrita.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados 22 furos de trado distribuídos em malha regular quadrada de 50 m (Figura 2) relativos a um dos corpos de minério do depósito. Os furos contêm na sua descrição a profundidade de início e fim do intervalo mineralizado em relação à superfície, a qual tem as coordenadas do local de sondagem levantada por equipamento topográfico de precisão. Além dos dados dos furos, foi empregado a uma base topográfica do terreno (tratada aqui como primitiva) obtida por aerolevanteamento laser com curvas de nível a cada 10 m de desnível.

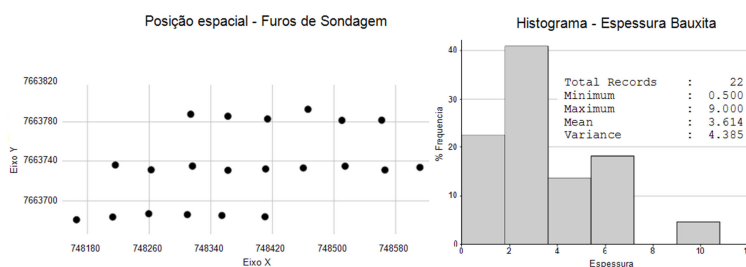


Figura 2 – Distribuição espacial dos 22 furos de trado (esquerda) e histograma da espessura da bauxita (direita). Fonte: Autor (2016)

2.2 Aplicação dos métodos típicos de interpolação de superfícies

Utilizando as profundidades do topo e base disponíveis em cada nó da malha de sondagem e as coordenadas dos furos é possível estimar o comportamento das camadas em locais não amostrados, obtendo uma superfície contínua. Tal superfície é tipicamente obtida através de métodos de interpolação, os quais devem ser capazes de ponderar informações levando em conta a dependência espacial dos valores

conhecidos do fenômeno, os chamados métodos geoestatísticos (MATHERON, 1963). Aqui são empregados o inverso da distância (elevado ao quadrado e ao cubo) e a krigagem ordinária:

- Estimadores pelo inverso a distância: Ao considerar a presença de dependência espacial entre os valores medidos, uma melhoria em relação a gerar uma média geral para todos pontos estimados é gerar uma média ponderada que dê maior peso para as amostras mais próximas. A solução mais direta e óbvia é a de gerar o peso proporcionalmente inverso a distância dos pontos, sejam pesos direto da distância ou proporcional a uma dada potência (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989, pp. 319-320);
- Krigagem ordinária: Nos métodos de krigagem, ao invés de considerar apenas a distância cartesiana entre as amostras e os nós, é definido o valor para cada nó que com menor variância do erro de estimativa através da distribuição ótima dos pesos entre amostras, o qual é dado através da covariância entre amostras. A distribuição do peso utiliza a uma função da variância média entre pares de amostras para uma dada distância e direção, o chamado de variograma.

Apesar do objetivo da resolução da equação de krigagem seja a de minimizar a variância do erro (o erro entre o valor estimado e o real), o método apresenta-se como melhor para diversos critérios, como ter o menor erro médio absoluto ou quadrático e ter em geral maior correlação entre valores estimados e reais, ambos quando comparados a métodos espaciais clássicos (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989, pp. 319-320).

Na modelagem dos variogramas experimentais de topo e base da bauxita foi utilizado o modelo teórico gaussiano com variância normalizada. O comportamento foi definido por uma estrutura única, anisotrópica, com efeito pepita de 0,01 e alcance de 140 m na direção Leste-Oeste e de 263 m na direção norte-sul (Figura 3), com estratégia de busca de amostras utilizando um mínimo de 3 e um máximo de 8 amostras em uma área com alcance igual ao range variográfico.

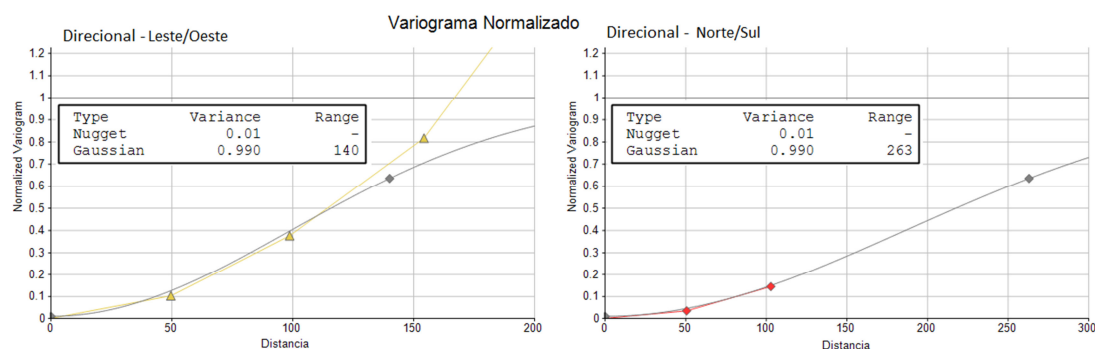


Figura 3 – Variograma experimental (em amarelo para Leste/Oeste e vermelho Norte/Sul) e seu respectivo modelo gaussiano (linhas cinza), para modelo variográfico das cotas de topo e base da camada mineralizada de bauxita. Fonte: Autor (2016)

Baseado nas três técnicas de interpolação discutidas acima e a base de dados disponível, foi estimado em um mesmo grid regular as camadas de topo e base da bauxita. A krigagem ordinária teve o melhor resultado apesar da maior suavização (Figura 4), já ao ponderar as amostras pelo quadrado da distância o resultado final foi uma superfície “enrugada”, com feições gerados pelo algoritmo de interpolação e não por características reproduzidas da superfície. Ao utilizar a potência cubica na ponderação, tais feições são

amplificadas, distanciando ainda mais as características do modelo em relação ao comportamento real observado.

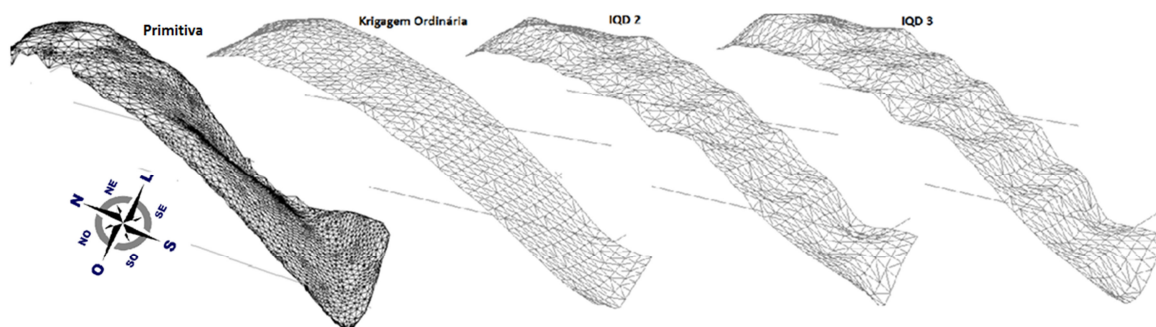


Figura 4 – Superfície Primitiva e camadas de topo da bauxita estimadas por Krigagem Ordinária, inverso do quadro e do cubo da distancia. Fonte: Autor (2016)

Ao comparar a superfície primitiva e os níveis de topo e base interpolados através dos três métodos (Figura 4), observa-se que em todas ocorreram interseções entre a camada de topo da bauxita e a superfície, principalmente nos locais onde não há dados amostrais e a superfície do terreno (superfície primitiva) contém variações bruscas, como depressões locais ou elevações abruptas, o que gera inversões na ordem das camadas (Figura 5).

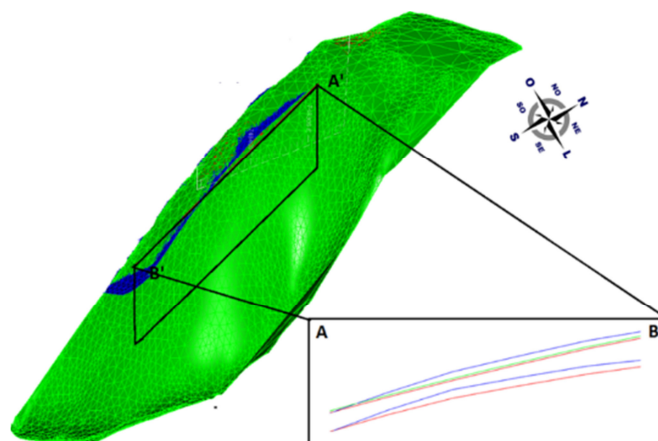


Figura 5 – Superfície primitiva (verde) e sua relação com a camada de topo krigada pelo método clássico (azul). Em detalhe as camadas de topo e base obtidas pelo método clássico (azul), método proposto (vermelho) e sua relação com a superfície primitiva (verde). Fonte: Autor (2016)

2.3 Proposição e aplicação da interpolação de espessura condicionada

Como forma de reproduzir a relação esperada entre as camadas do corpo de bauxita modelado, neste capítulo apresentaremos e aplicaremos o método proposto, onde a estimativa do grid regular é condicionada através da interpolação não mais de sua cota, mas de sua espessura e então a posição de cada camada é calculada em função da sua distância até a superfície superior e inferior. A metodologia pode ser empregada através de qualquer método de estimativa qualquer software que lide com modelos de superfície.

Considerando o perfil esquemático da Figura 6, onde Z1, Z2 e Z3 correspondem, respectivamente as cotas da superfície onde se situam os furos, do início do intervalo mineralizado (topo) e do fim da mineralização (base), a metodologia proposta é apresentada pelo seguinte passo-a-passo:

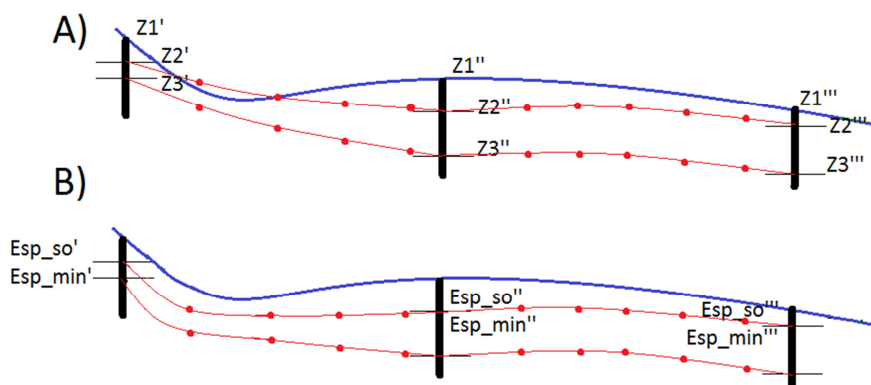


Figura 6 - Perfil esquemático entre superfície inicial (azul), grid auxiliar (pontos vermelhos) e superfície estimada (linha vermelha) em relação a informação disponível nos furos. A) Superfície pela estimativa das cotas e B) pelo método proposto, estimando a espessura da camada. Fonte: Autor (2016)

1. Na posição de cada furo é calculada a espessura da camada de solo (Esp_SO) através da diferença entre a cota do terreno e da base do solo, $Z_2 - Z_1$. Da mesma forma, a espessura da camada de bauxita, (Esp_MIN), é obtida pela diferença entre a cota da base do solo e da base da bauxita, $Z_3 - Z_2$;
2. Caso a interpolação utilize krigagem, realize a modelagem e análise variográfica das variáveis Esp_Min e Esp_SO. Do contrário, siga para o passo 3.
3. É gerado um grid regular. A densidade de pontos deve levar em conta a densidade de dados da superfície original (no caso, primitiva da superfície) e da capacidade computacional disponível para a fase de estimativa. Cada posição representada pelo grid regular tem as variáveis Esp_Min e Esp_SO estimadas pela técnica selecionadas;
4. Todos os nós do grid regular são projetados para a superfície primitiva e é gerado o nível de base do solo através da subtração dos valores estimados Esp_SO do valor da cota projetada na superfície. A base do minério é definida pela diferença entre a cota projetada na superfície após subtrair as espessuras ESP_SO e ESP_Min:

$$Z_{bs} = Z_{proj} - Esp_SO$$

$$Z_{bmin} = Z_{proj} - Esp_SO - Esp_Min$$

Onde:

Z_{bs} - Cota da base do Solo

Z_{proj} - Cota da interseção do furo com a superfície

Esp_SO - Espessura da camada de solo

Esp_Min - Espessura da camada de minério

5. Após a geração dos pontos do grid regular condicionadas à superfície primitiva, os valores pontuais são convertidos para uma MDS através do método de interpolação selecionado, e aos dados de espessura interpolados, somado aos dados iniciais, possibilitam a manutenção da relação de ordem entre as camadas.

Utilizando as três técnicas e parâmetros de estimativa apresentados, integrado ao método proposto para condicionamento, são novamente geradas as superfícies de topo e base de camada de bauxita.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade de avaliar os resultados dos métodos apresentadas e o proposto, são comparados os volumes obtidos pelas superfícies calculadas das diferentes formas. Dessa forma são geradas seis superfícies de topo e base da bauxita, utilizando duas diferentes estratégias de tratamento dos dados e três métodos de estimativa. Na Figura 7 observamos a relação em perfil da primitiva (em verde) com a camada obtida pelo método clássico (vermelho) e pelo proposto (azul). O MDS em azul, obtido por condicionamento entre as superfícies, apresenta maior fidelidade ao comportamento real ao não interceptar a superfície, demonstrando a aplicabilidade do método proposto.

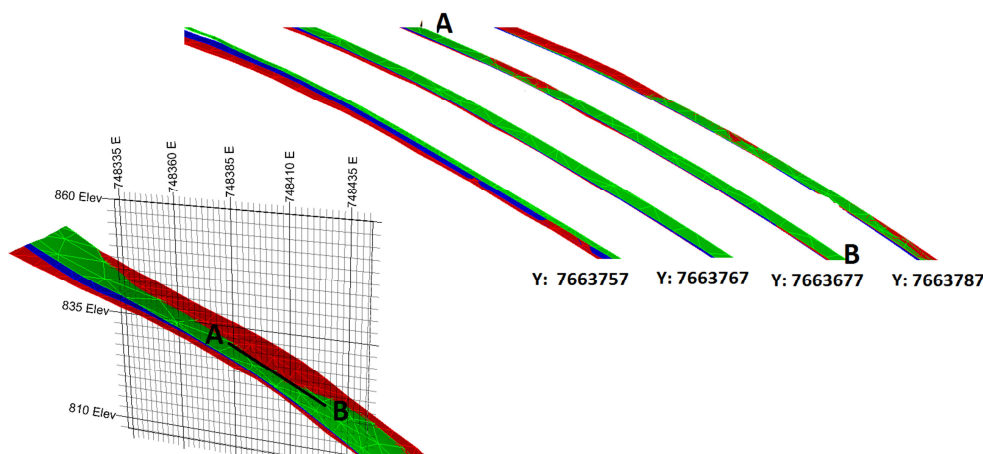


Figura 7 – Perfis paralelos ao norte e as relações entre a superfície primitiva (verde) e as bases obtidas por interpolação das cotas (vermelho) e o método proposto (azul). Fonte: Autor (2016)

Já as comparações dos volumes apresentam desvios entre as superfícies geradas pelos dois métodos. Nos resultados, agrupados por técnicas geoestatísticas, o método proposto encontrou os maiores volumes, variando de 0.06% na krigagem a até 0.21% com o inverso do cubo, refletindo a remoção de interseções das superfícies (Tabela 1).

Tabela 1 – Comparação entre os volumes obtidos entre a superfície do terreno e o topo da camada de bauxita obtida por diferentes métodos. Fonte: Autor (2016)

Método de estimativa	Método	Área projetada (m ²)	Volume (m ³)
Inverso do Quadrado	Clássico	45,580	38,833
Inverso do Quadrado	Proposto	45,580	38,899
Desvio - Inverso do Quadrado			0.17%
Inverso do Cubo	Clássico	45,580	38,842
Inverso do Cubo	Proposto	45,580	38,923
Desvio - Inverso do Cubo			0.21%
Krigagem Ordinária	Clássico	45,580	38,834
Krigagem Ordinária	Proposto	45,580	38,857
Desvio - Krigagem Ordinária			0.06%

4. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi a proposição de uma metodologia para a geração de superfícies subparalelas que solucionasse o problema de interseção entre elas, o qual geralmente ocorre quando é utilizado unicamente as ferramentas nativas dos principais softwares, as quais as superfícies são computadas e interpoladas de forma independente, portanto, sem a capacidade de honrar relações conhecidas dos dados. Foi avaliado o comportamento de camadas interpoladas pelo quadrado e cubo da distância e por krigagem ordinária, sendo a última a que gerou resultados mais fiéis aos dados, apesar de mais suavizados.

Os métodos de interpolação da cota e da espessura (e seguinte rebatimento das superfícies) foram comparados através de três métodos de interpolação em um caso real, onde foram geradas camadas de topo e base de um corpo tabular de bauxita em relação a superfície do terreno. A análise visual das 6 superfícies demonstrou a eficiência do método proposto. Quando avaliado o volume entre as superfícies, nos três casos houve aumento do valor calculado em relação ao método clássico, o que é endereçado a ausência de inversões entre as camadas.

Os resultados nos permitem concluir que metodologia proposta alcançou o objetivo de propor um método computacionalmente simples e que fosse possível de se aplicar em diferentes softwares que lidem com superfícies topográficas, possibilitando assim manter a relação espacial real entre superfícies verticalmente muito próximos, evitando interseções irreais ao aplicar qualquer método de interpolação.

5. REFERÊNCIAS

EMBRAPA. Disponível em <<http://www.cppse.embrapa.br/zoneamentos/imagens/Altimetria3.jpg>> Visitado em 12 de Agosto de 2015.

FELGUEIRAS, C. A. “Modelagem Numérica de Terreno”. In: CÂMARA, G. & MEDEIROS, J. S. eds.). “Geoprocessamento para Projetos Ambientais”. São José dos Campos: INPE, 1998.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press: New York, 1989.

MATHERON, G. Principles Principe’s of Geoestatistics. Economic Geology, Lacaster, v. 58, 1963, p.1246-1266.

ROMANO, A. CASTAÑEDA, C. A tectônica pós-Mesozóica na origem dos depósitos de bauxita da Zona da Mata Mineira. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2003, Ouro Preto. 12 Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Minas Gerais, 2003