

Planejamento de Levantamentos Magnetométricos Usando a Teoria dos Problemas Inversos

Renato Cordani (Reconsult Geofísica)
Carlos Alberto Mendonça (IAG/USP)

ABSTRACT

We present a procedure to design a magnetic survey whose corresponding data yield minimum variance estimates for the source model parameters. We applied this procedure to design some ground magnetic surveys constituted by a single fixed length profile aiming to better evaluate the width and depth to the top of dykes and pipes in low magnetic latitudes. Both acquisition parameters considered was the angle for the profile and the spacing between stations along line.

INTRODUÇÃO

Normalmente uma campanha de prospecção mineral emprega magnetometria terrestre para confirmar e detalhar feições geológicas previamente reconhecidas em levantamentos aerotransportados. Levantamentos terrestres nessa fase, denominados de *follow-up*, procuram também determinar as bordas e as profundidades do topo das fontes magnetizadas para orientar a prospecção por sondagem que geralmente sucede a prospecção geofísica.

Para efetuar um levantamento magnetométrico terrestre é necessário definir seus parâmetros de aquisição, no caso: orientação das linhas em relação às estruturas (ângulo de abordagem), separação entre as linhas, espaçamento ao longo da linha, comprimento da linha e número total de linhas. Geralmente tais parâmetros são escolhidos empiricamente com base na experiência da equipe (repetição de configurações tradicionalmente adotadas), critérios intuitivos (orientação das linhas ortogonalmente às estruturas), logísticos (abertura de linhas paralelas a estradas e rios) e econômicos (adoção de espaçamentos maiores entre linhas e estações para cobrir toda a área investigada).

Esse trabalho propõe um procedimento objetivo para escolher, entre um conjunto de proposições, a configuração de levantamento que fornece estimativas mais precisas, com menor desvio padrão, para os parâmetros do modelo que representam o substrato terrestre. Implicitamente, assume-se a existência de um modelo interpretativo que satisfaça as informações geológicas utilizadas e que seja compatível com as premissas estatísticas das medidas. A análise é efetuada no mesmo modelo matemático a ser empregado na modelagem dos dados, significando que, pelo menos para a representação idealizada da natureza fornecida pelo modelo, a configuração escolhida para o levantamento seria a mais adequada.

METODOLOGIA

A modelagem de dados geofísicos consiste em estimar um conjunto com m parâmetros, $\hat{p}^t = [\hat{p}_1 \ \hat{p}_2 \ \dots \ \hat{p}_m]$, de um modelo interpretativo que além de satisfazer as informações geológicas, produza uma anomalia teórica que ajusta os n dados medidos, $\hat{d}^t = [\hat{d}_1 \ \hat{d}_2 \ \dots \ \hat{d}_m]$, segundo as premissas estatísticas adotadas. Para simplificar a análise, porém sem perda de generalidade, pode-se utilizar informações *a priori* do tipo que estabelece um modelo inicial \bar{p}_o e admitir que os erros experimentais tenham um mesmo desvio padrão, s , distribuição normal e esperança nula. Tais premissas levam ao estimador por mínimos quadrados

$$\hat{p} = \bar{p}_o + \left(\overline{G_o^t G_o} \right)^{-1} \overline{G_o^t} (\bar{d} - \bar{d}_o) \quad (1)$$

cujas matriz de covariâncias é (Menke, 1984)

$$\text{cov}(\mathbf{D}\hat{p}) = s^2 \left(\overline{G_o^t G_o} \right)^{-1} \quad (2)$$

sendo

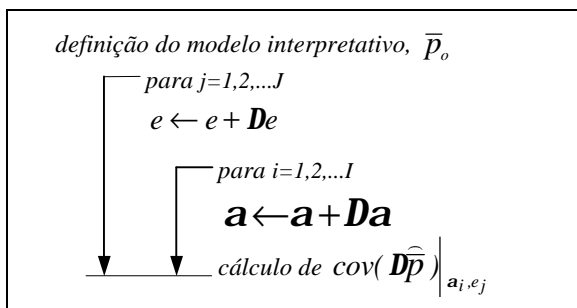
$$\mathbf{D}\hat{p} = \hat{p} - \bar{p}_o \quad (3)$$

Nas equações (1) e (2), $\overline{G_o}$ é a matriz de sensibilidade de ordem $n \times m$, cujo elemento (i,j) contém a derivada em relação ao j -ésimo parâmetro do modelo avaliada na i -ésima posição de medida, usando os valores preestabelecidos em \bar{p}_o , e \bar{d}_o a anomalia sintética correspondente à aproximação inicial. A equação (2) é válida sob a premissa que os erros que contaminam os dados sejam independentes, aditivos, com média nula e com mesmo desvio padrão e que os erros de posicionamento sejam desprezíveis. O elemento (i,j) da matriz $\text{cov}(\mathbf{D}\hat{p})$ de dimensão m , contém a covariância entre \hat{p}_i e \hat{p}_j . O i -ésimo elemento diagonal contém a variância da estimativa para o i -ésimo parâmetro do modelo.

A equação (2) mostra que a incerteza das estimativas depende de três fatores: precisão das medidas, natureza do fenômeno físico envolvido e configuração do levantamento (número, arranjo e posição em que as medidas são tomadas). A precisão das medidas não pode ser diminuída arbitrariamente pois reflete um estágio tecnológico em termos de instrumentação geofísica e de técnicas de posicionamento. Similarmente, não se pode modificar as leis físicas em que se baseia o método geofísico, restando então a possibilidade de modificar os parâmetros de

aquisição para que se obtenha estimativas mais precisas. Outra abordagem, não analisada nesse trabalho, consiste em utilizar informações *a priori* adicionais que levam a substituir o estimador da equação (1) e, conseqüentemente, modificar as variâncias das estimativas.

Para um levantamento magnetométrico constituído por apenas uma linha com comprimento pré-definido, pode-se determinar a melhor opção para o ângulo de abordagem \mathbf{a} e espaçamento ao longo das linhas, e , utilizando o seguinte procedimento (Cordani, 1997):



sendo $cov(\widehat{Dp})|_{\mathbf{a}_i, e_j}$ a matriz de covariância, dada pela equação (2), correspondente a um levantamento com espaçamento entre medidas, e_j , e ângulo de abordagem, \mathbf{a}_i . Atribuindo-se valores adequados para e_j e \mathbf{a}_i , bem como para os passos De e Da , pode-se calcular as variâncias das estimativas para todas as opções de configurações aceitáveis na prática, e assim identificar aquela que fornece a(s) estimativa(s) mais precisa(s). Uma vez determinada a melhor configuração, pode-se utilizar a decomposição em valores singulares (Rao & Sharma, 1996) para verificar quais os parâmetros devem ser conhecidos a priori pois, por estarem associados a valores singulares nulos ou muito pequenos, não podem ser recuperados unicamente a partir dos dados geofísicos.

APLICAÇÕES

modelo 1- dique

A primeira aplicação do algoritmo proposto consiste em determinar e e \mathbf{a} visando obter uma estimativa mais precisa para a profundidade do topo de um dique básico alongado representado por um prisma vertical, infinito em profundidade, com larguras de 50 e 1000 metros, respectivamente, nas direções N-S e E-W, profundidade do topo de 50 metros, magnetização apenas do tipo induzida com inclinação e declinação de -1 e -10 graus, respectivamente, e intensidade de 0,126 A/m. O algoritmo foi inicializado fazendo $e_j = De = 5$ metros, $J=10$, $\mathbf{a}_j = -40$ graus (contado a partir do norte e negativo no sentido anti-horário), $Da = 2$ graus e $I=41$. O comprimento do perfil foi de 300 metros com o dique situado na posição central (resultados semelhantes são obtidos para diques

ligeiramente afastados da posição central). O valor assumido para S foi de 1 nT.

A Figura 1 mostra os desvios padrão da profundidade do topo e da largura do dique em função do ângulo de abordagem para os espaçamentos de 5, 10, 30, 35 e 40 metros. Como seria de esperar, a precisão das estimativas aumenta com a diminuição do espaçamento ao longo da linha. Em todos os espaçamentos, o melhor ângulo de abordagem foi igual a -8 graus o qual corresponde a um perfil orientado ao longo da direção com maior variação pico-a-pico da anomalia. Na prática, utilizando um levantamento aeromagnético para definir essa direção, poder-se-ia posicionar um perfil terrestre com espaçamento de 35 metros para assim estimar a profundidade do topo com precisão de 3 metros. Caso o gradiente da anomalia não fosse previamente conhecido, a melhor opção seria adotar um espaçamento de 5 metros o qual, independente do ângulo de abordagem, fornece uma precisão da mesma ordem (Figura 1a).

A Figura 2 mostra que o melhor ângulo de abordagem independe da profundidade do dique, pelo menos para os valores investigados de 25, 75 e 100 metros adotando um espaçamento de 10 metros. Para um dique com profundidade de 100 metros, por exemplo, o desvio padrão no ângulo de abordagem de -8 graus seria de 20 metros e para zero graus (ortogonal à estrutura) seria de 68 metros. Portanto deve-se orientar o perfil com base no gradiente da anomalia e não considerando apenas o azimute das fontes já que a anomalia magnética apresenta distorções causadas pelas direções de magnetização e da componente de medida. Outro aspecto é que para diques rasos (com topo até 50 metros) a estimativa da largura é mais precisa que a da profundidade do topo verificando-se o contrário para diques mais profundos.

modelo 2- chaminé

Esse modelo é igual ao anterior exceto por apresentar secção quadrática com arestas iguais a 50 metros, orientadas nas direções E-W e N-S. O algoritmo foi inicializado atribuindo também os mesmos valores para e_j , De e J fazendo porém \mathbf{a}_j , Da e I respectivamente iguais a -90, 5 e 37.

A Figura 3 mostra os desvios padrão para as larguras e profundidade do topo em função do ângulo de abordagem para espaçamentos de 5, 10,15 e 30 metros. Tal como para o modelo anterior, os melhores ângulos de abordagem independem do espaçamento ao longo da linha, pelo menos para a faixa de valores investigadas. Os melhores ângulos para estimar a profundidade do topo são -35, -30 e 25 graus. Já as larguras N-S e E-W do modelo seriam melhor estimadas por perfis praticamente paralelos às arestas consideradas (5 e ± 85 graus, respectivamente): a primeira com precisão de 3 metros e a segunda com precisão de 18 metros já que em baixa latitude a variação da anomalia é mais suave nessa direção. Tanto a largura N-S quanto a profundidade do topo podem ser estimadas satisfatoriamente usando um espaçamento de 30 metros (desvios padrão de 6 e 7 metros,

respectivamente) nos ângulos de abordagem correspondentes. Porém, a mesma configuração de levantamento não é apropriada para profundidades do topo de 75 e 100 metros conforme mostra a Figura 4, com os resultados da análise para chaminés com topo em 25, 50, 75 e 100 metros. Para 100 metros por exemplo, o desvio padrão seria maior que a própria estimativa, indicando ser oportuno considerar um outro levantamento que utilize um maior número de perfis. Para chaminés mais rasas (até 50 metros) um único perfil parece ser adequado para estimar o topo e a largura N-S.

CONCLUSÃO

O procedimento apresentado permite projetar levantamentos mais rápidos e baratos bem como descartar configurações que não fornecem estimativas suficientemente precisas para auxiliar o planejamento de uma prospecção por sondagem. Sua implementação exige a adoção de um modelo matemático para os

corpos em subsuperfície embora os resultados obtidos possam ser suficientemente genéricos caso a análise seja repetida para um conjunto de modelos na vizinhança daquele inicialmente proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAFESP pelo Auxílio Pesquisa, 95/2159.7, concedido.

REFERÊNCIAS

CORDANI, R. - 1997 - Planejamento de levantamentos geofísicos usando a teoria dos problemas inversos; aplicação na prospecção de kimberlitos. Dissertação de mestrado IAG - USP.

MENKE, W. - 1984 - Geophysical data analysis: discrete inverse theory. Academic Press.

VERMA, K.S.; SHARMA, S.P. - 1995 - Focused resolution of thin conduction layers by various dipole EM systems. Geophysics, **60**, 381-389.

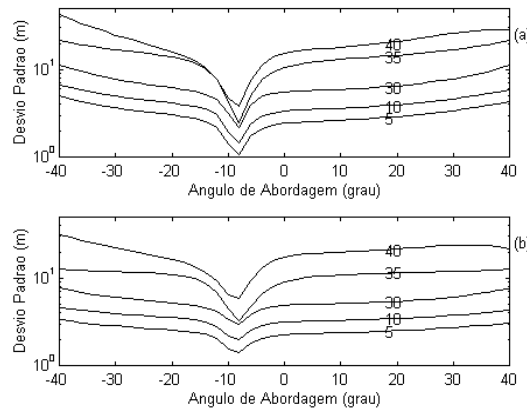


Figura 1 - Modelo 1 - Desvio padrão da profundidade do topo (a) e largura (b) para espaçamentos ao longo da linha de 5, 10, 30, 35 e 40 metros.

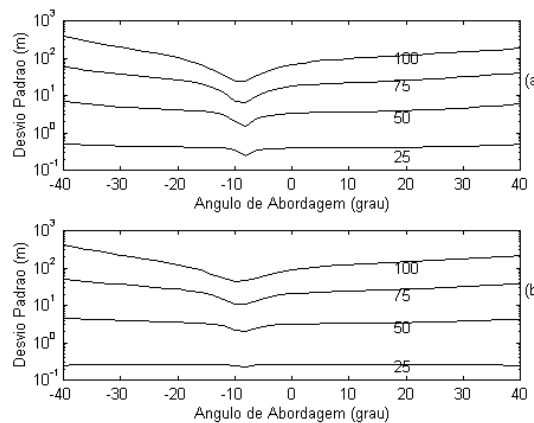


Figura 2- Modelo 1 - Desvio padrão para a profundidade do topo (a) e largura na direções N-S (b) para diques com topos em 25, 50, 75 e 100 metros. O espaçamento ao longo da linha é de 10 metros.

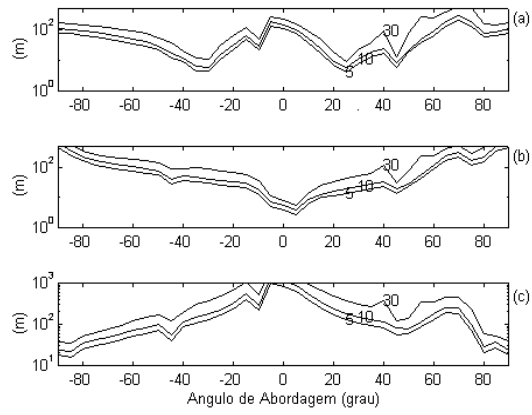


Figura 3 - Modelo 2 - Desvio padrão para a profundidade do topo (a), larguras N-S (b) e E-W (c) para espaçamentos ao longo da linha de 5, 10 e 30 metros.

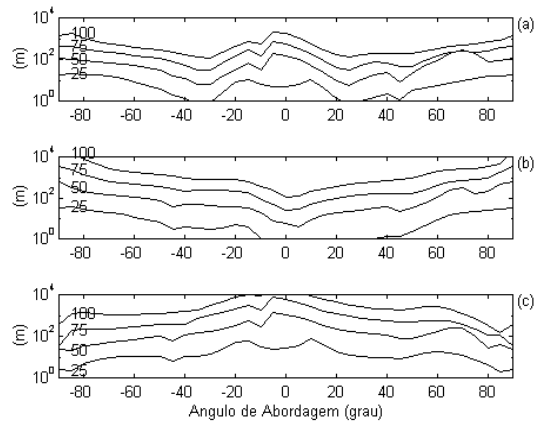


Figura 4 - Modelo 2 - Desvio padrão para a profundidade do topo (a), larguras N-S (b) e E-W (c) para *pipes* com profundidades do topo em 25, 50, 75 e 100 metros. O espaçamento ao longo da linha é de 10 metros.