

# MODELAGEM DE DADOS AEROMAGNÉTICOS PARA ESTIMAR LARGURA E ESPESSURA DO COMPLEXO MÁFICO/ULTRAMÁFICO DE CAMPO FORMOSO-BA

## *MODELING AIRBORNE MAGNETIC DATA TO ESTIMATE WIDTH AND THICKNESS OF THE MAFIC/ULTRAMAFIC COMPLEX OF CAMPO FORMOSO, BAHIA STATE, BRAZIL*

Francisco José Fonseca Ferreira<sup>1</sup>

Raimundo Almeida Filho<sup>2</sup>

Francisco Valdyr da Silva<sup>3</sup>

### RESUMO

O complexo máfico/ultramáfico Campo Formoso, no estado da Bahia, é constituído por rochas metamórficas de alto grau, derivadas de peridotitos e piroxenitos do Proterozóico Inferior. Em superfície, ele estende-se por cerca de 40 km, com larguras variando entre 100 e 1.100 metros. Apesar de encerrar as mais importantes mineralizações de cromo conhecidas no Brasil, os conhecimentos geológicos sobre o complexo ainda são bastante limitados. O profundo intemperismo e a presença de coberturas aluviais e coluviais dificultam o mapeamento geológico dessas rochas. Estimativas sobre largura e espessura do complexo em subsuperfície são importantes, visto que, por tratar-se de um corpo estratiforme, níveis mineralizados em superfície podem prolongar-se até grandes profundidades. Neste estudo, dados aeromagnéticos são analisados visando a obter informações sobre a extensão do complexo em subsuperfície. Para isso, um método iterativo de modelagem de corpos magnéticos tabulares por processo de inversão foi empregado em uma área selecionada, onde ocorrem alguns dos mais importantes depósitos de cromo conhecidos no complexo. A técnica de modelagem empregada permite o cálculo de parâmetros tais como mergulho, largura e espessura de corpos de geometria simples, magnetizados por indução, remanência, ou

<sup>1</sup> Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada-LPGA/UFPR, Caixa Postal 19001, Curitiba-PR, CEP 81531-990. <[francisco.ferreira@ufpr.br](mailto:francisco.ferreira@ufpr.br)>

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE; Caixa Postal 515; São José dos Campos-SP. <[rai@ltd.inpe.br](mailto:rai@ltd.inpe.br)>

<sup>3</sup> Landmark Graphics, Av. Presidente Wilson 231/2502, Rio de Janeiro-RJ, CEP 20030-021. <[valdyr@bdep.gov.br](mailto:valdyr@bdep.gov.br)>

ambos. O algoritmo empregado usa valores iniciais para cada parâmetro do corpo a ser modelado, os quais podem ser modificados pelo analista, de modo a incorporar dados reais. Esses dados são manipulados interativamente na busca de um "melhor ajuste", de modo que os parâmetros ajustados caiam dentro de limites de tolerância especificados pelo usuário. A qualidade do ajuste é medida pela relação da soma ponderada dos desvios quadráticos entre valores observados e calculados. Tomando-se como base a geologia da área de estudo, selecionou-se o modelo de dique espesso finito tabular 2 ( $2\frac{3}{4}$ -D) como o mais apropriado para representar o complexo. Os resultados de modelagens em três perfis indicaram corpos magnéticos com larguras variando entre 264 e 374 metros, espessuras entre 432 e 470 metros e mergulhos entre  $52^\circ$  e  $68^\circ$  para SE.

*Palavras-chave:* modelagem magnética; cromita; Complexo Campo Formoso.

## ABSTRACT

The Campo Formoso complex is located in the Bahia State, in the northeastern part of Brazil. The complex comprises high-grade metamorphic rocks derived from peridotite and pyroxenite of Early Proterozoic age. Mafic/ultramafic rocks cover an area approximately 40 km long and 100 to 1100 m wide, with a general NE-SW direction, dipping to the southeast. This complex hosts the most important chromium deposit of Brazil. This deposit occurs in the southern portion of the complex which makes up a lower structural block, better preserved by the erosion than the northern portion. In spite of its economic importance, geological knowledge of the complex is still very limited. The deep weathering of the mafic/ultramafic rocks and the presence of alluvial and colluvial deposits difficult geological mapping. It is a stratiform complex and the mineralized layers may extend down to great depths. Therefore it is important to know the width and thickness of its rocks in subsurface. In this study airborne magnetic data were analyzed to obtain information of the subsurface extent of the Campo Formoso complex. In order to do that an interactive modeling method of tabular magnetic bodies with inversion process was applied in a selected area of the southern portion of the complex. The used model calculates depth, thickness, and dip of a simple geometry body, magnetized by induction, remanence, or both. This procedure helps to find the best possible match between a theoretical anomaly and a given set of magnetic data. The best fit is found when the adjusted parameters fall within a user-specified tolerance of values which minimize the weighted sum of squared deviations between the observed and the theoretical magnetic anomaly. When a set of parameters satisfies the best-fit criterion, confidence ranges are calculated for all parameters. According to geological data, the best model assumed for the ore body was a thick, flat-topped dyke of finite strike length 2 ( $2\frac{3}{4}$ -D) and a finite variable depth extent. The modeling results of three profiles of the study area indicate magnetized bodies varying width from 264 to 374 m, thickness from 432 to 473m, and dipping from  $52^\circ$  to  $68^\circ$  SE.

*Key-words:* magnetic modeling; chromite; Campo Formoso complex.

## INTRODUÇÃO

O complexo máfico/ultramáfico de Campo Formoso encerra as mais importantes mineralizações de cromo conhecidas no Brasil, as quais vêm sendo exploradas desde as primeiras décadas do século passado. Apesar disso, os conhecimentos geológicos sobre o complexo são ainda bastante limitados. O mapeamento geológico é prejudicado pelo profundo intemperismo das rochas máficas/ultramáficas e pela presença de coberturas aluviais e colúviais, pouco se conhecendo também sobre o comportamento espacial do complexo em subsuperfície. Estudos que visem a trazer maiores informações sobre o comportamento espacial do complexo são de grande valia, visto que, por tratar-se de um corpo estratiforme, níveis mineralizados conhecidos em superfície podem prolongar-se em subsuperfície. Tratando-se de rochas máficas/ultramáficas ricas em minerais

ferromagnéticos, o emprego de dados magnetométricos afigura-se como uma estratégia recomendável para o estudo do complexo, como demonstrado por Almeida Filho et al. (1999). No presente estudo, dados aeromagnéticos são analisados através de um método interativo de modelagem de corpos magnéticos tabulares por processo de inversão, visando à obtenção de informações sobre o comportamento espacial do complexo em subsuperfície.

A área de estudo (figura 1) localiza-se nos municípios de Campo Formoso e Senhor do Bonfim, centro-norte do estado da Bahia, e é definida pelas coordenadas de  $10^\circ 27'$  -  $10^\circ 37'$  de latitude sul e  $40^\circ 15'$  -  $40^\circ 30'$  de longitude oeste. O complexo Campo Formoso, constituído por rochas máficas/ultramáficas do Proterozóico Inferior, ocorre como uma faixa alongada de direção geral NE-SW com cerca de 40 km de extensão e larguras entre 100 e 1100 metros. Ele encontra-se alojado em rochas de alto grau metamórfico do embasamento (com-

plexo metamórfico-migmatítico) e sotoposto às seqüências metassedimentares do complexo Itapicuru, através da falha de Jacobina (LEO et al., 1964), supostamente de caráter inverso. Suas relações de contato com o embasamento e com o batólito granítico de Campo Formoso não são claramente observadas dado o profundo intemperismo e a presença de coberturas aluviais e colúviais. A espessura original do complexo foi estimada entre três e quatro mil metros por Thayer (1970) e Gonçalves et al. (1972), tendo sido erodidas suas porções superior e média. A figura 2 é o mapa geológico da área de estudo, extraído da folha Antônio Gonçalves (SC.24-Y-B- IV-1) do projeto Serra de Jacobina (COUTO et al., 1978).

Embora se trate de um complexo estratiforme, a observação da continuidade de suas seqüências em campo é dificultada, devido ao material original ter sido metamorfozido em diferentes graus, além de sofrer

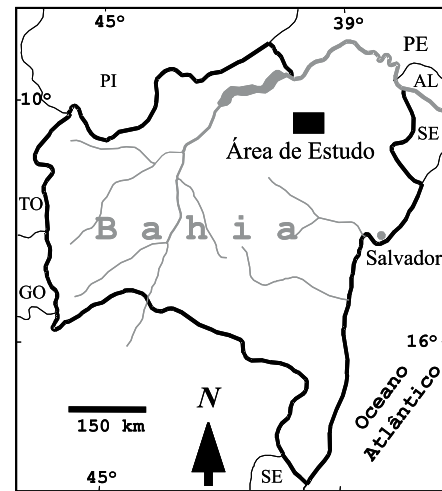


Figura 1: Localização da área de estudo no estado da Bahia. Location of the studied area in Bahia State

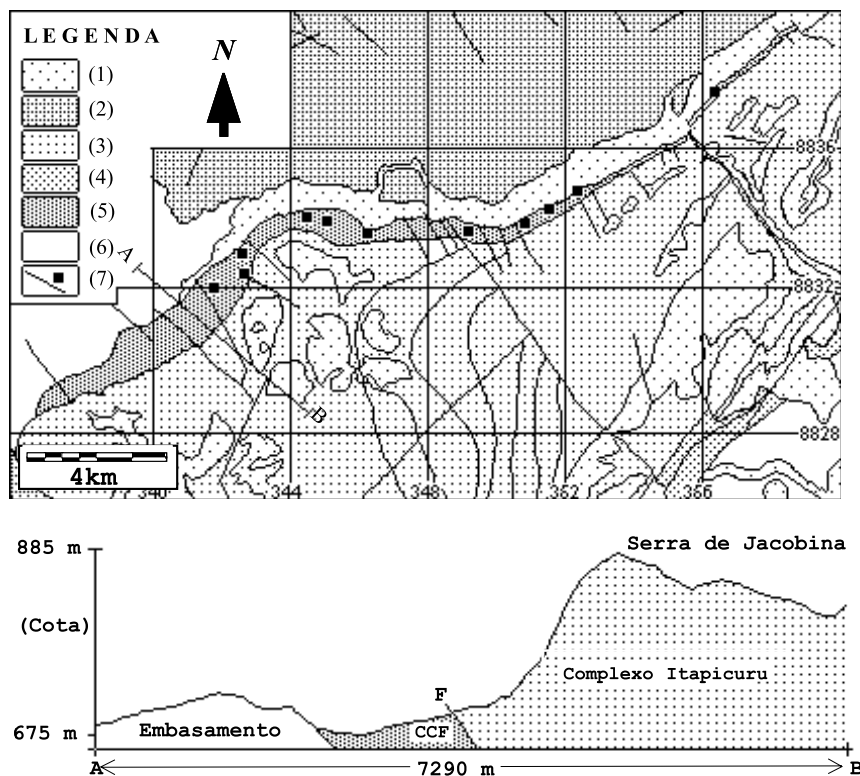


Figura 2: Mapa e perfil geológicos generalizados da área de estudo (modificado de COUTO et al., 1978): (1) Depósitos Aluviais e Colúviais; (2) Granitóides; (3) Complexo Itapicuru; (4) Complexo Saúde; (5) Complexo Campo Formoso; (6) Embasamento; (7) Falhas e Depósitos de Cromo. Generalized geological map and profile of the studied area (modified from Couto et al. 1978): (1) Alluvial and Colluvial Deposits; (2) Granitoids; (3) Itapicuru Complex; (4) Saúde Complex; (5) Campo Formoso Complex; (6) Basement; (7) Faults and Chromium Deposits.

tectonismo, serpentinização e alteração intempérica. Dados do projeto Cromo de Campo Formoso (GONÇALVES et al., 1972) indicam uma seqüência (da base para o topo) de actinolita gnaisse, tremolita-actinolita serpentinito e serpentina-clorita-carbonato-talco xistos, admitidos como derivados de peridotitos e piroxenitos. Estudos de Duarte e Fontes (1986) nas minas Pedrinhas e Limoeiro, constataram a existência de mineralizações em pelo menos sete níveis estratigráficos distintos com espessuras máximas de 12 metros.

**MATERIAL E DADOS**

Os dados aeromagnéticos foram obtidos pelo projeto Serra de Itiúba (ANJOS et al., 1980), no qual foi utilizado um magnetômetro modelo *Geometrics G-803*, com precisão igual a 1,0 nT. A altura média de vôo foi de 135 metros, com direção N45W. As linhas foram espaçadas de 1.000 metros com intervalo médio de 110 metros entre as medidas. Para a geração da malha regular, empregou-se um método bidirecional de interpolação, optando-se por uma grade regular de 125 metros (1/8 do espaçamento médio entre as linhas de vôo). Um interpolador linear foi usado ao longo das linhas de vôo (em função da grande densidade de informação), enquanto um interpolador *Akima spline* foi aplicado na direção perpendicular. De modo a evitar a interferência de pequenas anomalias, aplicou-se um filtro do tipo passa baixa, com freqüência de corte igual ao inverso do dobro da dimensão da célula (freqüência de Nyquist = 0,004 ciclos/metro),

eliminando-se as anomalias com comprimentos de onda menores ou iguais a 250 metros. Os dados foram corrigidos da variação diurna, subtraindo-se também o campo principal da Terra, representado pelo *IGRF (International Geomagnetic Reference Field)*, correspondente ao ano de 1975. Aplicou-se aos dados magnéticos residuais assim gerados, um filtro de redução ao equador (considerando-se que na área estudada a inclinação do campo geomagnético  $I = -12^\circ$ ), de modo a centrar as anomalias diretamente sobre os corpos causadores. Para esses processamentos, utilizou-se o *software Magmap* (Geosoft, 1994a).

A figura 3 mostra o campo magnético residual reduzido ao equador, indicando-se também a faixa de afloramentos do complexo Campo Formoso e a localização dos perfis usados na modelagem dos corpos magnéticos. A faixa anômala associada às rochas máficas/ultramáficas do complexo, em matizes de azul e cian, apresenta quebras e mudanças de direção, possivelmente resultantes de esforços tectônicos. Ela estende-se inicialmente com orientação NE-SW até próximo às coordenadas UTM 342/8833, onde toma direção próxima a E-W. Segue com esta orientação até próximo às coordenadas 350/8836, onde volta a adquirir a direção original NE-SW, dividindo-se em segmentos menores.

**MODELAGEM DE CORPOS MAGNÉTICOS**

A técnica de modelagem empregada permite o cálculo de parâmetros tais como mergulho, largura e

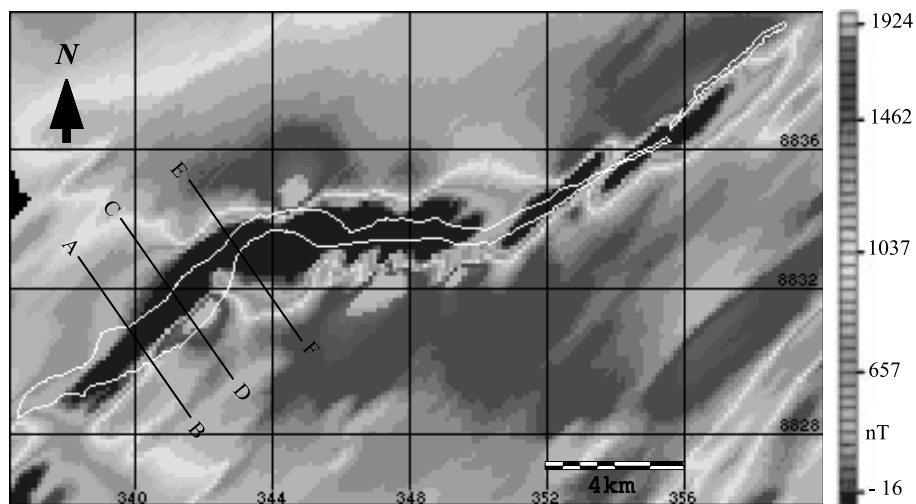


Figura 3: Campo magnético residual reduzido ao equador, mostrando em destaque a anomalia magnética associada ao complexo máfico/ultramáfico Campo Formoso. A faixa de afloramento do complexo e a localização dos perfis usados para a modelagem são também indicadas.  
 Figure 3: Residual magnetic field reduced to the equator, showing in hues of blue and cyan the magnetic anomaly associated with the Campo Formoso complex. The outcropeal area of the complex and the profiles used in the modeling are also indicated.

espessura de corpos de geometria simples, magnetizados por indução, remanência, ou ambos. É possível utilizar quatro modelos teóricos: *Step* (2-D); *Ribbon* (2-D), *Tabular 1* (2-D) e *Tabular 2* (2¾-D). O algoritmo adota valores iniciais para cada parâmetro do corpo a ser modelado, os quais podem ser modificados pelo analista, de modo a incorporar dados reais. Esses são ajustados iterativamente, até encontrar-se um ajuste satisfatório, através de um critério de "melhor ajuste", significando que os parâmetros caem dentro de limites de tolerância especificados pelo usuário. Durante o processo de ajuste os, dados teóricos, reais e o modelo geométrico são atualizados a cada nova iteração. Quando um conjunto de parâmetros que satisfaz ao "melhor ajuste" é encontrado, o programa calcula os intervalos de confiança para todos os parâmetros. A qualidade do ajuste é medida pela relação da soma ponderada dos desvios quadráticos entre valores observados e calculados. Os cálculos sempre assumem que o perfil analisado é representado por uma linha reta, perpendicular à direção do corpo. Tomando-se como base a geologia da área de estudo, selecionou-se o modelo de dique espesso finito tabular 2 (2¾-D), como o mais apropriado para representar o complexo Campo Formoso. As principais características geométricas envolvidas no modelo são mostradas em corte e em planta na figura 4. Uma completa discussão sobre a aplicação do modelo é encontrada em Geosoft (1994b).

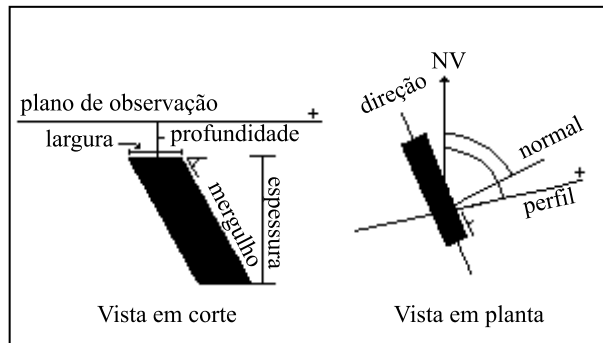


Figura 4: Representação esquemática dos parâmetros geométricos envolvidos no modelo tabular 2 (2¾-D) em corte e em planta (fonte: GEOSOFT, 1994b). Schematic representation of the main parameters associated with the Tabular 2 (2¾-D) model in section and plan views (source: Geosoft, 1994b).

Para o modelo de dique espesso finito tabular 2 (2¾-D), a soma ponderada a ser minimizada é dada pela seguinte expressão:

$$S = \sum \{W_i [T_i - (T_o + a[x_i - x_o] + b[x_i - x_o]^2) - f(x_i; x_o; M, Q, i, c, d, h, t, X, Y; I, D, S, P)]^2\}$$

onde,

$x_i$  = distância contada a partir do início da linha do levantamento;

$T_i$  = valor da anomalia magnética observada (no caso, campo total) no ponto  $x_i$ ;  
 $T_o$  = *background* regional de T no ponto  $x=0$ ;  
 $a$  = inclinação do *background* regional (ajustável)  
 $b$  = segunda derivada horizontal do *background* regional na direção  $x$ ;  
 $f$  = valor teórico da anomalia magnética (no caso, campo total) do modelo ;  
 $x_o$  = coordenada do centro da face horizontal superior do modelo;

Os parâmetros ajustáveis do modelo são:

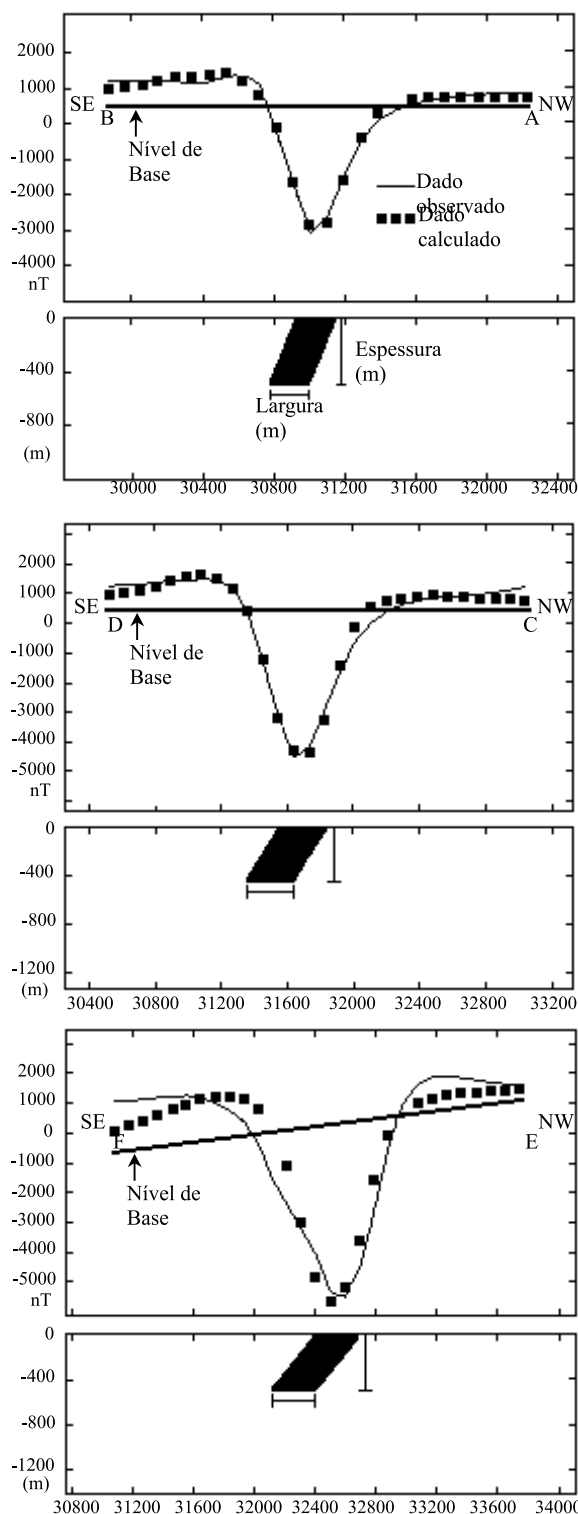
- M = magnetização;
- i = inclinação remanente;
- c = declinação remanente;
- d = mergulho;
- h = profundidade; t = espessura;
- X = meia-largura;
- Y = meia-extensão;
- Q = razão de remanência da magnetização (fator de Koenigsberger).

Os parâmetros fixos do modelo são:

- I = inclinação magnética;
- D = declinação magnética;
- S = direção perpendicular;
- P = direção do perfil.

As modelagens foram aplicadas nos perfis A-B, C-D e E-F transversais ao corpo magnético, indicados na figura 3. Os parâmetros geométricos de entrada, com base em dados de campo, foram os seguintes: (a) 30 metros como profundidade máxima ao topo dos corpos (compensando possíveis variações de altura da aeronave durante a aquisição dos dados) e (b) corpo com mergulho variando entre 50° e 70° para SE. Devido à ausência de dados paleomagnéticos, admitiu-se a existência somente de magnetização induzida, com susceptibilidade magnética arbitrada entre 0,08 e 0,3 *emu*. Em todos os casos, a intensidade do campo magnético total foi de 25.200 nT, com inclinação de -12° e declinação de -21°. Os parâmetros geométricos resultantes das modelagens são mostrados na figura 5.

Na área correspondente ao perfil A-B foi modelado um corpo magnético com mergulho de 68° para SE, largura de 264 m e espessura de 473 m. Já os perfis C-D e E-F mostraram os seguintes resultados: mergulhos de 58° e 52° para SE, larguras de 374 m e espessuras de 432 m e 470 m, respectivamente. Modelagens sempre comportam diferentes possibilidades de soluções, que muitas vezes podem levar a resultados ambíguos. No entanto, para o caso específico da área de estudo, os resultados obtidos mostraram um bom ajuste entre



Dados do Perfil A-B:

Profundidade ao topo	10 m
Largura do corpo	264 m
Espessura do corpo	473 m
Mergulho do corpo	68° SE
Susc. magnética aparente	0,080 emu

Dados do Perfil C-D:

Profundidade ao topo	10 m
Largura do corpo	374 m
Espessura do corpo	432 m
Mergulho do corpo	58° SE
Susc. magnética aparente	0,100 emu

Dados do Perfil E-F

Profundidade ao topo	30 m
Largura do corpo	374 m
Espessura do corpo	470 m
Mergulho do corpo	52° SE
Susc. magnética aparente	0,195 emu

Figura 5: Parâmetros geométricos e geofísicos de corpos magnéticos tabulares obtidos por modelagens nos perfis A-B, C-D e E-F indicados na figura 3. *Geometric and geophysical parameters of tabular magnetic bodies obtained by interactive modeling in the A-B, C-D and E-F profiles indicated in figure 3.*

dados observados e calculados, resultando em uma configuração espacial coerente com a geologia da área, o que confere confiabilidade aos resultados teóricos obtidos. O menor ajuste foi verificado no perfil E-F, localizado ao longo de uma zona de falha, onde análises pelo método *Gridth* (ALMEIDA FILHO et al., 1999) indicaram a ocorrência de fontes magnéticas profundas e deslocamento de fontes. Além disso, o mapa geológico da área (figura 2) mostra a ocorrência de diques de rochas básicas a intermediárias de orientação NW naquele local. Estas características locais reunidas podem ter contribuído para reduzir o nível de ajuste nesse perfil.

## CONCLUSÕES

Modelagens interativas de corpos magnéticos tabulares por processo de inversão permitiram inferir características geométricas de subsuperfície para o complexo máfico/ultramáfico Campo Formoso. Embora os procedimentos matemáticos envolvidos possam levar a resultados ambíguos, comportando diferentes possibili-

dades de soluções, os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a geologia da área, permitindo uma primeira estimativa sobre as dimensões do complexo na região investigada, ou seja: larguras entre 264 e 374 metros; espessuras entre 432 e 473 metros e mergulhos entre 52° e 68° para sudeste. As modelagens revelaram valores de profundidade dos corpos magnéticos compatíveis com aqueles obtidos por Almeida Filho et al. (1999), através da técnica de Deconvolução de Euler, atestando confiabilidade aos resultados obtidos no presente estudo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-Fapesp e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, pelo apoio à realização da pesquisa, a qual foi também suportada pelo INPE e pelo LPGA/UFPR, e a dois revisores do BPG pelas sugestões ao texto original. Agradecemos também à Professora Dra. Maria José Maluf de Mesquita pela revisão do Abstract.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, R.; FERREIRA, F. J. F.; SILVA, F. V.; VENEZIANI, P. Contribuição ao estudo do complexo máfico/ultramáfico de Campo Formoso usando sensoriamento remoto e dados aeromagnéticos. *Rev. Bras. de Geociências*, v. 29, p. 203-206, 1999.
- ANJOS, I. L. S. MOURÃO, L. M. F.; MARINHO, F. A. V.; METELO, M. J.; CARDOSO, C. E. *Projeto Serra de Itiúba: relatório final*. DNPM/CPRM, v. 2, 1980. 18 p.
- COUTO, P. A.; GIL, C. A. A.; LOUREIRO, H. C.; ARCANJO, J. B.; FERNANDES FILHO, J.; GUIMARÃES, J. T.; CAMPELO, R.; MASCARENHAS, J. R.; BRUNI, D. C.; TOLEDO, L. A. A.; GONÇALVES, G. D. *Projeto Serra de Jacobina: geologia e prospecção geoquímica*. Relatório final. Departamento Nacional de Produção Mineral / Companhia de Produção de Recursos Minerais, 1978. 347 p.
- DUARTE, P. M.; FONTES, C. F. Minas de cromita das fazendas Limoeiro e Pedrinhas, município de Campo Formoso, Bahia. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C. E. S. *Principais depósitos minerais do Brasil: ferro e metais da indústria do aço*. Departamento Nacional de Produção Mineral / Cia Vale do Rio Doce, v. 2, cap. 17, 1986. p. 207-216.
- GEOSOFT *Magmap: 2-D frequency domain processing*. Geosoft Inc. Toronto, 1994a. 34 p.
- GEOSOFT. *Magmod: interactive magnetic anomaly inversion*. Geosoft Inc. Toronto, 1994b. 47p.
- GONÇALVES, J. C. V. et al. *Projeto Cromo de Campo Formoso: relatório final*. Departamento Nacional de Produção Mineral / Cia de Produção de Recursos Minerais, 1972. 181 p.
- LEO, G. W.; COX, D. P.; CARVALHO, J. P. P. *Geologia da parte sul da Serra de Jacobina, Bahia, Brasil*. Departamento Nacional de Produção Mineral / Divisão de Geologia e Mineralogia, 1964. 87 p. (Boletim 209).