

DETECÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE ZN-Pb ATRAVÉS DE SENSORES REMOTOS E SIGs

LUCAS DE MELO MELGAÇO
CARLOS ROBERTO DE SOUZA FILHO (ORIENTADOR)

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – UNICAMP
Caixa Postal 6152 - 13083-370 - Campinas - SP, Brasil
(lmelgaco, beto)@ige.unicamp.br

Abstract. One of the challenges in the detecting of ore bodies in tropical environments is the discrimination between iron-rich surfaces, originated from the supergenic alteration of the sulphides ('gossans'), and generic lateritic crusts, also rich in iron, however, unrelated to metallic ores.

This paper aims to integrate plan-altimetric, magnetometric and multispectral remote sensing data (i.e., Landsat-7 ETM+) in a GIS environment, in order to decrease the ambiguity involved in mapping of genuine gossans and to incorporate new tools to the prospecting of sulphides bodies.

The results achieved in this work suggest that the areas that simultaneously comprise spectral iron anomalies and both magnetic and topographic highs are directly related to Pb-Zn occurrences documented in the region.

Keywords: remote sensing, magnetometry, geology.

1. RESUMO

Um dos principais desafios na detecção de corpos mineralizados em ambientes de clima tropical é a separação entre superfícies ricas em ferro, geradas como consequência da alteração supergênica de sulfetos ('gossans'), e crostas lateríticas genéricas, também ferruginosas, mas sem nenhuma associação a esses depósitos.

O objetivo deste trabalho compreendeu a integração de dados plani-altimétricos, magnetométricos e de sensoriamento remoto multiespectral (dados do sensor Landsat-7 ETM+) em ambiente SIG, visando diminuir a ambigüidade no mapeamento de gossans genuínos e incorporar novas ferramentas para prospecção de corpos de sulfeto.

Os resultados obtidos indicam que áreas que comportam simultaneamente a presença de anomalias espectrais de ferro, altos magnéticos e altos topográficos, relacionam-se diretamente a ocorrências de Pb-Zn documentadas na região, o que demonstra a adequação dos métodos avaliados para o mapeamento de seqüências potencialmente ricas nesses metais.

2. INTRODUÇÃO

A detecção de rochas portadoras de concentrações metálicas em ambientes de clima tropical está frequentemente sujeita a ambigüidades. Um dos métodos mais comuns para esta detecção se baseia na interpretação de imagens de satélites visando destacar as superfícies ricas em ferro. Neste caso, porém, a imagem realça tanto as superfícies ricas em ferro, geradas como consequência da alteração supergênica de sulfetos ('gossans'), quanto as crostas lateríticas, também ferruginosas, mas sem nenhuma associação a depósitos metálicos.

Esta ambigüidade pode ser tentativamente resolvida com a superposição, em ambiente SIG, de outros planos de informação complementares, entre os quais dados plani-altimétricos e magnetométricos. A justificativa para o uso destas duas categorias de dados é baseada na hipótese de que os gossans, gerados pelo intemperismo de sulfetos, sustentam o relevo na forma de morros testemunhos e, simultaneamente, possuem um alta resposta magnética.

Sendo assim, neste trabalho, buscou-se relacionar as áreas onde essas três variáveis coincidem com as áreas com mineralizações de Zn-Pb já detectadas em campo, utilizando como área teste as exposições de rochas Pré-cambrianas que ocorrem entre os municípios Itacambira e Monte Azul (N – NE de MG).

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

De acordo com a compartimentação tectônica proposta por Almeida (1977), a área de estudo está inserida no contexto da Faixa de Dobramentos Araçuai na Província da Mantiqueira, borda sudeste do Cráton do São Francisco. O arcabouço geológico da borda leste do Cráton do São Francisco, entre Itacambira e Monte Azul, é controlado por uma janela estrutural que possibilita a exposição de rochas magmáticas, metamorfisadas ou não, e metassedimentares formadas até o final do ciclo Transamazônico (Guimarães *et al.*, 1993). Esta janela, foco deste estudo, foi denominada de **Bloco Itacambira-Monte Azul** (Guimarães *et al.* 1993).

Delimitando esta estrutura, de aproximadamente 30 Km de comprimento, ocorrem rochas dos Supergrupos São Francisco (Gr. Macaúbas e Gr. Bambuí) e Espinhaço (Mesoproterozóico e Neoproterozóico, respectivamente) (Crocco-Rodrigues *et al.* 1992).

4. MÉTODOS

O método de trabalho partiu da seleção dos mapas a serem utilizados, seguida da digitalização, vetorização e inserção dos mesmos em ambiente SIG. Após esta primeira etapa foram gerados, no ambiente SIG e em programas auxiliares, mapas digitais de superfícies contínuas (isarítmicos), incluindo mapas do campo magnético anômalo, sinal analítico e topográfico. Uma outra etapa do trabalho compreendeu o processamento de dados multi-espectrais adquiridos pelo sensor ETM+ a bordo do satélite Landsat-7. Os resultados obtidos em cada uma das etapas anteriores foram integrados para uma avaliação qualitativa das possíveis relações existentes entre os níveis de informação temática e os depósitos metálicos documentados na área de estudo.

ETAPA 1: digitalização dos mapas analógicos (cópias heliográficas) - os mapas do campo magnético anômalo foram escaneados utilizando-se um scanner de tambor e transformados em arquivos de imagens digitais no formato TIFF (raster).

ETAPA 2: vetorização dos mapas digitais - o processo de vetorização foi realizado empregando-se o módulo de vetorização semi-automática Arc-Scan, do Sistema de Informações Geo-referenciadas Arc-Info. Os mapas digitais em formato TIFF foram importados e geo-referenciados, utilizando-se as bases planialtimétricas, escala 1:100.000, do IBGE (datum SAD-69, projeção UTM), e ferramentas de processamento do Arc-Info, sendo em seguida exportados no formato *.DXF. No software AutoCAD foram atribuídos os valores de cotas (retirados dos mapas analógicos) aos contornos vetorizados. Finalmente, os arquivos *.DXF foram convertidos para arquivos no formato ASCII (x,y,z) compondo a base de dados digitais.

ETAPA 3: geração de superfícies contínuas do campo magnético anômalo & interpolação em malha regular - o ordenamento de dados em forma de malhas e com pontos espaçados à determinada distância é obtido a partir da interpolação dos mesmos, empregando-se diferentes métodos (Hansen 1993, Ribeiro 1993, Stevanato 1995). Na escolha da célula unitária para dados orientados em linhas, Vasconcelos *et al.* (1992) sugerem valores entre 1/4 e 1/8 do espaçamento entre elas, com o objetivo de não incorporar frequências maiores que a de Nyquist (Davis 1986) e evitar perda de informação. Neste trabalho, a escolha do melhor método de interpolação foi feita com base em testes com os principais métodos descritos na literatura: curvatura mínima (Briggs 1974; Swain 1976), inverso do quadrado da distância (Kekler 1994), Krigagem (Krige 1986; Cressie 1990) e “spline” (De Boor 1962; Bhattacharya 1969). Na seleção, levou-se em consideração o método que apresentasse o menor desvio padrão na interpolação dos dados e também aquele capaz de gerar imagens que visualmente mais se aproximassem dos mapas analógicos originais. De forma geral, todos os métodos testados ofereceram bons resultados, destacando-se o método da Mínima Curvatura, que foi escolhido como o método de interpolação padrão. Visto o espaçamento de 2 km entre as linhas de vôo do levantamento geofísico Brasil-Alemanha, e considerando-se as ponderações de Vasconcelos *et al.* (1992), a malha resultante foi calculada, para todos os dados, com uma célula de 250m. Após a seleção do melhor método de interpolação, obteve-se as imagens do campo magnético anômalo (Bhattacharyya 1966), as quais serviram de base para aplicação de algumas técnicas de processamento digital. O resultado final obtido nessa etapa é fornecido na Fig.1.

ETAPA 4: geração de mapas de sinal analítico a partir dos dados do campo magnético anômalo e representação dos mesmos em pseudocor - a imagem do campo magnético anômalo é somente capaz de realçar as anomalias magnéticas de uma forma geral. O cálculo do sinal analítico, a partir dos dados do campo anômalo, permite, por sua vez, a determinação de

parâmetros geométricos da fonte anômala (bordas do corpo magnético), sem a influência do campo magnético terrestre e da direção de magnetização da fonte (Nabighian, 1972). Para a construção do mapa de sinal analítico foi utilizado o software OASIS MontajTM da GEOSOFT, o qual possui um algoritmo direcionado para esta transformação (Fig. 2).

ETAPA 5: digitalização, vetorização e geração de superfícies contínuas dos dados topográficos – o procedimento utilizado foi o mesmo já citado nas etapas 1-3 para os dados magnetométricos (Fig. 3).

ETAPA 6: Processamento Digital dos dados do LANDSAT-7 ETM+ e Geração do Mapa de Índice de Ferro - o processamento digital da imagem Landsat-7 ETM+ teve como objetivo mapear áreas ricas no íon Fe^{3+} , para posterior geração de um mapa de índice de ferro. As imagens resultantes do processamento foram interpretadas diretamente nos monitores de vídeo de estações de trabalho, possibilitando a máxima discriminação de cores e de detalhes. A interpretação das áreas anômalas em ferro foi feita através de um *layer* vetorial, diretamente sobre as imagens produzidas pelas várias técnicas de processamento utilizadas. O trabalho foi realizado utilizando o software ER Mapper Versão 6.1.

As técnicas de processamento digital e interpretação utilizadas para atingir o objetivo indicado em epígrafe foram as seguintes:

(1) **Geo-referenciamento e corte da cena Landsat-7 ETM+**. Inicialmente, a cena foi cortada digitalmente, com o objetivo de restringir os dados da cena à área de estudo. As seis bandas espectrais ETM+ e a banda pancromática foram então corrigidas geometricamente com base em 25 pontos de controle derivados de mapas topográficos do IBGE, na escala 1:100.000. A transformação das coordenadas foi modelada usando-se um polinômio linear de 1^ª ordem, obtido através dos mínimos quadrados em relação aos pontos de controle (Crosta, 1993). As seis bandas foram corrigidas utilizando a projeção UTM (sul), zona23, e como 'datum' o WGS84. A reamostragem dos pixels da imagem transformada foi feita pelo método do vizinho mais próximo, com intuito de 'preservar' o valor original dos DN's, algo indispensável para as rotinas posteriores de discriminação espectral de alvos (Crosta, 1993).

(2) **Processamento Digital**. Com base no comportamento espectral empírico dos alvos presentes na cena Landsat, as bandas disponíveis foram combinadas em composições coloridas. Três tripletes fundamentais foram utilizados na etapa de reconhecimento das características espectrais da cena: 321 (composição colorida cor real – para o realce de superfícies ricas em ferro, as quais são caracterizadas por um alto de reflectância na região do vermelho do espectro (banda 3) e absorções nas regiões do verde e do azul (bandas 2 e 1)); 432 (composição colorida infravermelho, para realce das áreas cobertas por vegetação – esta que interfere na resposta espectral de materiais geológicos, mascarando-os) e 531 (composição colorida infravermelho, que melhor realça as principais unidades geológicas). Estes tripletes passaram por um aumento de contraste não-linear, através da técnica Realce de Contraste Balanceado (Guo, 1991), implementado através de uma função parabólica, capaz de manter as estruturas dos histogramas originais das imagens.

(3) **Interpretação das imagens e Confecção do Mapa de Índice de Ferro**. A interpretação dos produtos derivados do processamento da imagem foi realizada interativamente na tela do monitor de vídeo. Polígonos (vetores) foram traçados manualmente sobre as áreas anômalas em Fe, utilizando como base todos os produtos digitais produzidos para o realce espectral destas anomalias. É importante salientar que estas anomalias têm origens múltiplas, podendo se tratar de gossans, carapaças lateríticas, ou mesmo solos ricos em Fe, expostos parcialmente devido a atividades agro-pecuárias. A separação entre estas várias coberturas ricas em Fe não pode ser

resolvida, com a confiabilidade necessária, somente com base em dados multiespectrais de baixa resolução, como o TM. A Figura abaixo ilustra o mapa de índices de ferro obtido para a área de estudo (linhas brancas), sobreposto à imagem ETM+ (bandas 321 RGB). (Fig. 4)

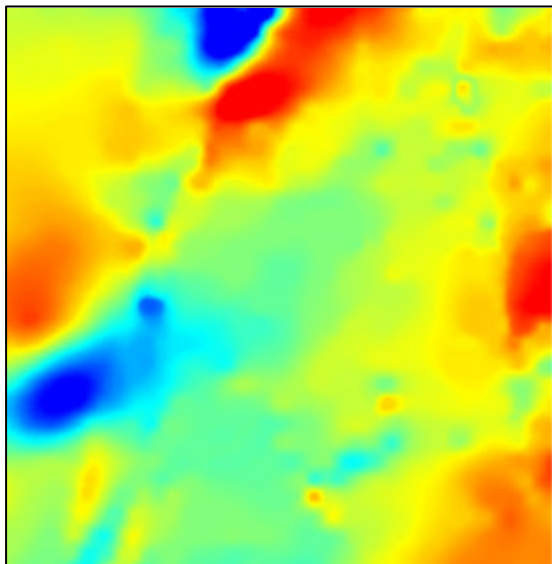


Figura 1. Etapa 3: Superfície contínua gerada através da interpolação em malha regular dos dados magnetométricos vetoriais, utilizando o método da Mínima Curvatura.

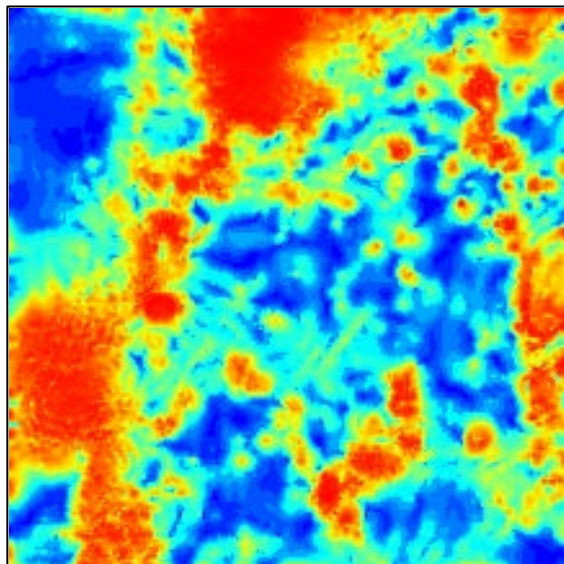


Figura 2. Etapa 4: Mapa de Sinal Analítico gerado para determinação de parâmetros geométricos da fonte anômala (bordas do corpo magnético), sem a influência do campo magnético terrestre e da direção de magnetização da fonte.

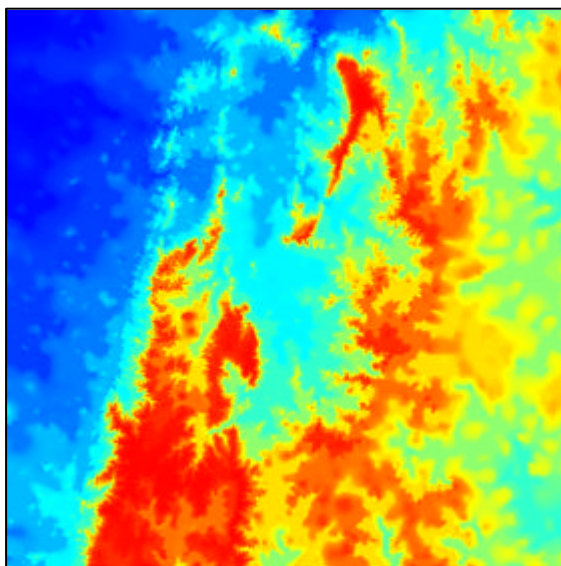


Figura 3. Etapa 5: Superfície contínua gerada através da interpolação em malha regular dos dados topográficos vetoriais, utilizando o método da Mínima Curvatura

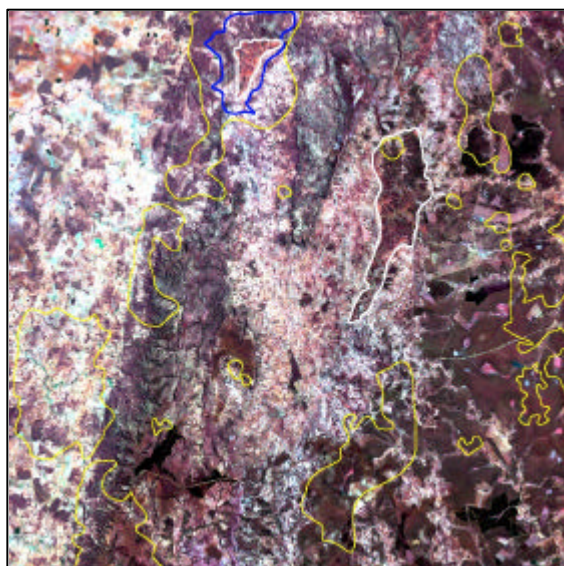


Figura 4. Etapa 6: Cena Landsat-7 ETM+ composição colorida 3,2,1 (RGB), com realce de contraste BCET. Linhas brancas representam zonas ricas em ferro onde há registros da ocorrência de depósitos metálicos. Linhas amarelas e azuis representam área com alta intensidade do sinal analítico.

5. INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

Os seguintes produtos foram integrados para análise:

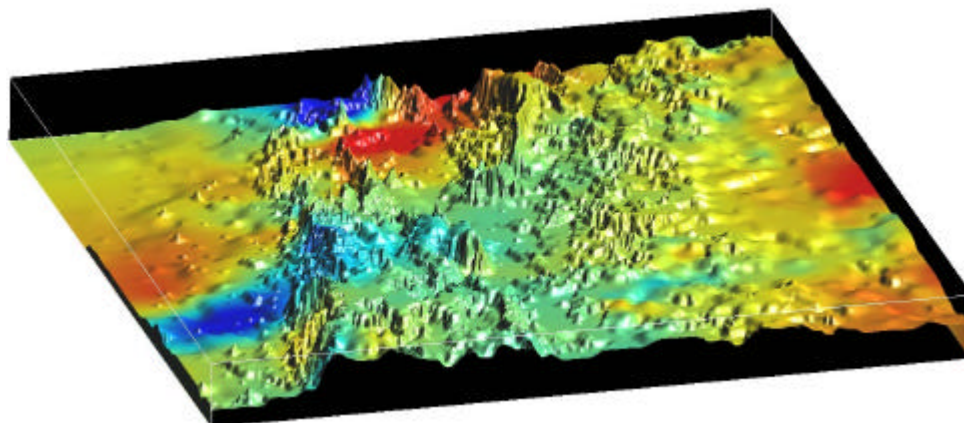


Figura 5. Imagem do campo magnético anômalo superposta à superfície topográfica (3D)

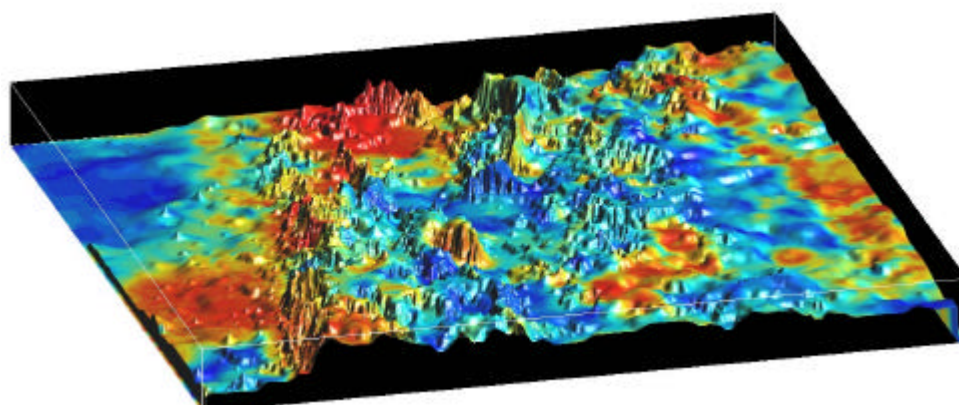


Figura 6. Imagem do sinal analítico superposta à superfície topográfica (3D)

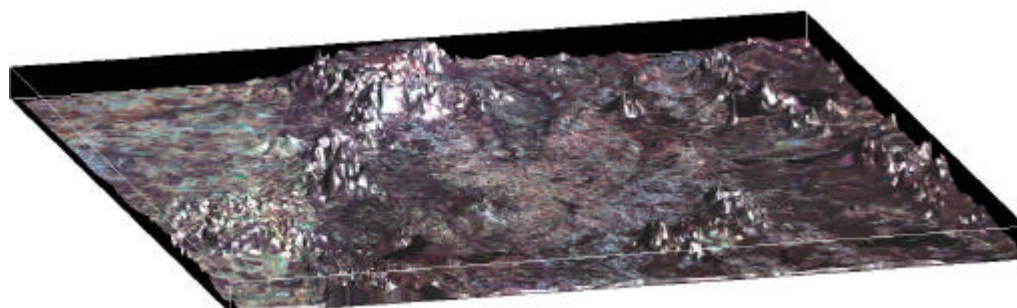


Figura 7. Composição colorida composta (RGB) das bandas 3,2,1 do sensor ETM+, superposta à superfície 3D gerada a partir da imagem do sinal analítico (3D).

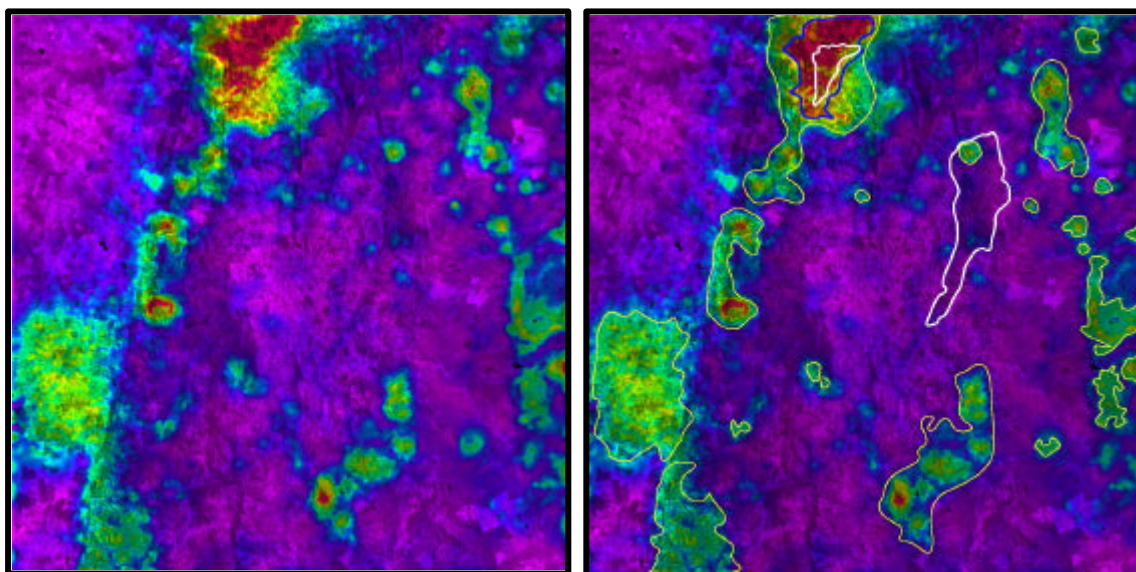


Figura 8. Imagem do sinal analítico classificada superposta à banda ETM+ 5 (a) e comparação entre as zonas de alta intensidade magnética (linhas em amarelo e azul) e zonas ricas em ferro (linhas brancas) (b).

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A fusão dos resultados obtidos do processamento dos dados plani-altimétricos, magnetométricos e multiespectrais sugere uma boa correlação entre altos topográficos, altos magnéticos e áreas ricas em ferro, particularmente onde um importante depósito metálico (e.g., depósito poli-metálico –ferro, chumbo, zinco – de Barreiro, a NW da área) já foi documentado (F.R. Abreu - Companhia Vale do Rio Doce, com. verbal).

Uma segunda área, na porção central do setor de estudo, também com registros de ocorrências de metais (ouro disseminado em rocha) e caracterizada por superfícies ricas em ferro (a partir do processamento dos dados multiespectrais), não é relacionada a altos topográficos e magnéticos. Essa situação pode ser interpretada e justificada pela diferença entre os tipos de rochas que normalmente encaixam depósitos auríferos, as quais, neste caso, provavelmente são pobres em minerais magnéticos. Assim, a superfície rica em ferro que recobre essas rochas deve corresponder ao produto do intemperismo de carbonatos de ferro e alguns poucos minerais de sulfeto contidos nas rochas encaixantes.

A quase totalidade da região leste da área de estudo, dominada por superfícies lateríticas, relativamente mais planas e também com alto conteúdo de ferro em superfície, foi amplamente separada de áreas constituídas por rochas genuinamente associadas a depósitos metálicos, justamente em função da baixa resposta magnética que apresentam. Entretanto, algumas zonas em meio a esses terrenos lateríticos mostram fortes anomalias magnéticas. Isso pode significar que parte dessas lateritas tenha sido formada sobre rochas potencialmente portadoras de depósitos metálicos.

7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que áreas que comportam simultaneamente a presença de anomalias espectrais de ferro, altos magnéticos e altos topográficos, relacionam-se diretamente ao principal depósito metálico documentado na região, o que demonstra a adequação dos métodos avaliados

para o mapeamento desta e talvez de outras áreas no bloco Itacambira-Monte Azul, potencialmente ricas em metais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M., 1977, O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7 (4), p.349-364.
- Bhattacharyya, B. K. 1966. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to rectangular prismatic body. *Geophysics*, 2, **31**, 97-121.
- Bhattacharyya, B. K. 1969. Bicubic spline interpolation as a method for treatment of potential field data. *Geophysics*, 6, **34**, 402-423.
- Briggs. I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 1, **39**, 39-48.
- Cressie, N. A. 1990. The Origins of Kriging. *Math Geology*, **22**, 239-252.
- Crocco-Rodrigues, F.A.; Vidigal, M.L.; Carneiro, N.M.; Greco, S.M.C.; Freitas, M.E. & Costa, W.D., 1992, Mapeamento Geológico- Estrutural em escala de 1:50.000 da região de Riacho dos Machados (MG). Relatório interno DOCEGEO – Geologia e Mineração. 102p.
- Crósta, A.P., 1993, Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto, Unicamp, 170p.
- De Boor, C. 1962. Bicubic Spline interpolation. *Journal of Mathematic and Physicist*, **41**, 212-218.
- Guimarães, M.L.V.; Crocco-Rodrigues, F.A.; Abreu, F.R.; Oliveira, O.A.B. ; Greco, F.M., 1993, Geologia do Bloco Itacambira - Monte Azul entre Barroco e Porteirinha (MG).In: SBG/ Núcleo MG, VII Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Anais 12, p. 74- 78.
- Guo, J.L. 1991. Balance Contrast Enhancement Techniques and its Applications in Image Colour Composition. *IJRS*, 12 (10), p. 2133-2151.
- Hansen, R. O. 1993. Interpretive gridding by anisotropic kriging. *Geophysics*, 10, **58**, 1491-1497.
- Kekler, D. 1994. Surfer[®] for Windows. *User's Guide*. Golden Software, Inc.
- Krige, D. G. 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surface for ore valuation. *Journal South African Institute Mining and Metallurgy*, 3, 13-38.
- Luiz, J.G.; Silva, L.M.C.; 1995. Geofísica de Prospecção, Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- Ribeiro, C. E. 1993. Transformação de Dados Aerogeofísicos em Imagens Raster utilizando Mínima Curvatura. *III Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Boletim de resumos expandidos*, Rio de Janeiro, RJ, 1013-1018.
- Stevanato, R.; Ferreira, F. J.; Soares, P.C. 1995. Desempenho de métodos de interpolação espacial na composição de mapas aerogeofísicos. *IV Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Boletim de resumos expandidos*, Rio de Janeiro, RJ, 252-255.
- Swain, C. J. 1976. A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the different equations for minimum curvature. *Computer & Geosciences*, **1**, 231-240.
- Vasconcelos, R.; Metelo, M.; Motta, A.; Gomez, R. 1992 *Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil*. CPRM. Rio de Janeiro, 165p.