



A Utilização de Produtos Derivados de Aerogeofísica de Alta Resolução no Mapeamento Geológico da Serra de Bom Sucesso, Porção Meridional do Cráton São Francisco.

Saulo Alves Carreiro de Araújo, IG/UnB, Brazil
Felipe Soares Fernandes Coelho, IG/UnB, Brazil
Adalene Moreira Silva, IG/UnB, Brazil
Catarina Labouré Toledo, FUP/UnB, Brazil
Peter Christian Hackspacher, UNESP, Brazil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

THE USE OF HIGH RESOLUTION AIRBORNE GEOPHYSICAL DATA IN GEOLOGICAL MAPPING OF BOM SUCESSO RIDGE, SOUTH PART OF SÃO FRANCISCO CRÁTON. The Bom Sucesso ridge is formed by paleoproterozoic metasedimentary rocks and belongs to an important lineation which divides archaic and paleoproterozoic terrains in the south part of São Francisco Craton. Some geophysical airborne and remote sensor derived products are used for geological mapping of Bom Sucesso Ridge as images from gamma and magnetometric data, K-means unsupervised classification and supervised classification for magnetometric data, associated with data integration in georeferenced information system (GIS), could be related with field observations. This paper shows the geophysical characterization and how it allows to enrich geological features and rectify the tectonic setting.

Resumo

A Serra de Bom Sucesso pertence a um lineamento importante que divide terrenos arqueanos e paleoproterozóicos na porção sul do Cráton São Francisco. Esse trabalho demonstra uma metodologia de integração de imagens obtidas a partir dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos. Em relação aos dados gamaespectrométricos elaborou-se um mapa litogeofísico de domínios. Para os dados magnetométricos foi realizada a classificação não supervisionada (algoritmo K-means), para delimitação dos domínios magnéticos. Dessa forma, essas imagens serviram como uma importante ferramenta para o mapeamento geológico. Posteriormente foi realizada a classificação supervisionada (algoritmo paralelepípedo) para auxiliar a interpretação de estruturas e corpos magnéticos. Tal metodologia permitiu validar a configuração tectônica da Serra de Bom Sucesso, delimitar as feições geológicas importantes e apoiar a elaboração de mapa geológico na escala de 1:50.000 da área.

Introdução

A utilização de dados aerogeofísicos de alta resolução no estudo da região do Quadrilátero Ferrífero e adjacências,

forneceu informações importantes a respeito da assembléia tectônica da porção sul do Cráton São Francisco (Silva *et al.* 2003). Imagens combinadas gamaespectrométrica-magnéticas revelam a existência de diferentes domínios tectônicos nesta região e retratam a estrutura interna e a geometria dos limites entre os mesmos. O limite mais evidente é caracterizado por um lineamento que se estende de forma irregular desde a Serra de Bom Sucesso até os arredores do Quadrilátero Ferrífero (Jaceaba), e separa os complexos arqueanos de uma região fortemente retrabalhada durante o evento termo-tectônico Transamazônico (Figura 1).

A Serra de Bom Sucesso possui as melhores exposições deste importante lineamento da borda meridional do Craton São Francisco e está localizada a oeste da cidade homônima, no sul de Minas Gerais. Ela é edificada por rochas metassedimentares paleoproterozóicas correlacionáveis ao Supergrupo Minas e é marcada por zonas de cisalhamentos direcionais, com direção aproximadamente N30°E, que formam um corredor de deformação ao longo da serra e nos seus arredores.

Este trabalho demonstra que a integração de imagens obtidas a partir dos dados gamaespectrométricos e magnetométricos associados aos dados geológicos e integrados em plataforma Sistema de Informações Georeferenciadas (SIG) possibilita uma correlação dos dados o que favorece na interpretação de imagens geradas e permiti a utilização de técnicas de sensoriamento remoto já conhecidas como classificação supervisionada (algoritmo paralelepípedo) e não supervisionada (algoritmo K-means) para o mapeamento geológico.

O objetivo do trabalho corresponde na elaboração de uma metodologia eficiente para caracterização e discriminação de assinaturas geofísicas e sua correlação com os litotipos e estruturas geológicas gerando por fim um mapa geológico da área na escala de 1: 50000.

O sistema de coordenadas utilizado foi o Córrego Alegre, Datum UTM zona 23S

Natureza dos dados

A área de estudo é coberta pelos dados do Projeto Pitangui-São João Del Rey-Ipatinga (Figura 1). Os métodos empregados neste aerolevantamento foram magnetométrico e o gamaespectrométrico, com altura de voo fixada em 100 m sobre o terreno e com espaçamento entre as linhas de voo a cada 250 m e com espaçamento entre as linhas de controle a cada 2.500 m. As direções das linhas de voo são de N30E e N60W e linhas de controle perpendiculares à essas.

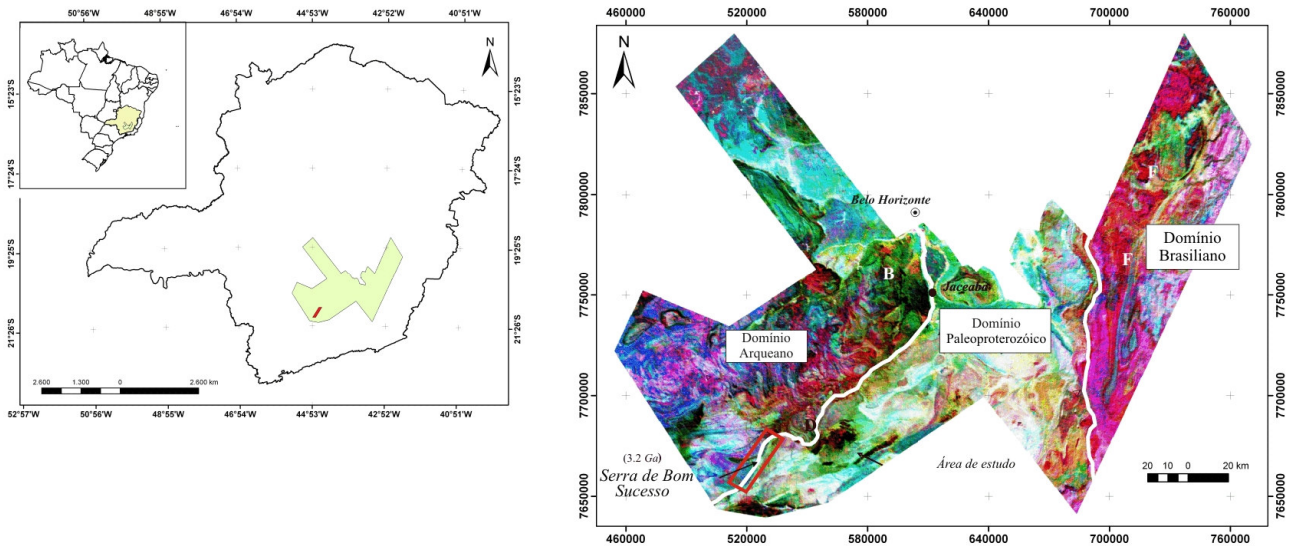


Figura 1: Localização da área (em vermelho) no mapa do Brasil, de Minas Gerais e na área do levantamentos aerogeofísico Pitangui-São João Del Rey-Ipatinga. Modificado de Silva *et al.* 2003.

Processamento

Primeiramente os dados foram analisados estatisticamente se atentando para os valores mínimo, máximo, média e desvio padrão para cada canal de interesse, dentre esses dados destaca-se o campo magnético anômalo e os canais individuais de contagem total, potássio, tório e urânio. Com relação aos canais de K, eTh, eU, eles foram corrigidos para que suas médias correspondesse a aproximadamente 2,5 %, 12 ppm e 2,0 ppm, respectivamente. Esses valores correspondem às médias dos valores encontrados na crosta de acordo com Dickson e Scott (1997).

No processamento dos dados foi empregada a versão OASIS MONTAJ 7.1.0 do sistema GEOSOFT. Para a interpolação dos dados seguiram-se as rotinas do Oasis Montaj de *minimum curvature* (RANGRID) para os dados radiométricos e *bi-directional line gridding* (BIGRID) para os dados magnetométricos. As malhas regulares foram interpoladas com dimensões de 62,5 x 62,5m, o que equivale a um quarto do espaçamento entre as linhas de vôo.

Logo após, foi realizado o micro nivelamento em que ocorre a eliminação de ruídos (altas frequências) e retirada de tendência de amostragem no sentido da linha de vôo. O processo envolveu a rotina de Blum (1999), que consiste na geração de duas malhas auxiliares resultantes da aplicação do filtro passa-alta atuando na direção das linhas de vôo e perpendicularmente à elas, seguindo-se, então, a criação de uma malha final desnivelado.

A interpretação das imagens resultantes do processamento gamaespectrométrico, ocorreu pela análise qualitativa dos produtos Contagem Total, canais individualizados e razões de K/eTh/eU, integração dos canais e integração dos dados gamaespectrométrico com modelo digital do terreno. Para a fase qualitativa foram utilizados os mapas na escala de 1:25.000 (já que o

resultado final está em 1:50.000) das imagens dos diferentes produtos nas formas 2D e 2,5D, com o intuito de avaliar a distribuição dos radioelementos com a topografia e para separar as unidades radiométricas. Em seguida foi elaborado o mapa litogeofísico gamaespectrométrico, no qual ocorre a definição de domínios gamaespectrométricos a partir do mapa ternário RGB (K:eTh:eU) seguindo o procedimento;

- Análises das assinaturas geofísicas diretas comparativas e simultâneas das imagens de potássio, tório, urânio e contagem total no monitor, utilizando o software OASIS MONTAJ 7.1.0. Para as análises, as escalas de cores utilizadas associavam valores baixos aos tons azuis, valores médios aos tons verde-amarelos e valores altos aos tons vermelhos. Também foram utilizadas as imagens ternárias CMY e RGB, bidimensionais e sobreposição dessas à representação em dimensão 2,5 D do modelo digital do terreno;
- Definição de unidades gamaespectrométricas utilizando a composição RGB, levando em consideração a variação dos radioelementos em diferentes rochas, de acordo com o modelo de assinatura radiométrica de Dickson e Scott, 1997 nas imagens dos canais K, eU, eTh;
- Elaboração de mapas de domínios gamaespectrométricos, através do software Arc-Gis 9.2 com base nos produtos mencionados e realce das imagens utilizando o software EnviTM 4.3.

A interpretação das imagens resultantes do processamento dos dados magnetométricos, ocorreu na análise qualitativa dos mapas transformados: amplitude do sinal analítico (ASA), inclinação do sinal analítico (ISA), amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) e a integração destes produtos. Para a fase qualitativa foram utilizadas as mesmas metodologias dos mapas

gamaespectrométricos, com o intuito de avaliar o comportamento magnético da área.

Os lineamentos magnéticos foram extraídos dos mapas de ISA, AGHT e derivada vertical. Foi procedida uma análise comparativa direta destas imagens e a realização de interpretações para cada uma delas. Também foram utilizadas as integrações de ISA mais ASA e ASA e a derivada vertical.

Essas integrações serviram para correlacionar possíveis corpos magnéticos com feições estruturais e auxiliarem na demarcação de grandes lineamentos existentes na área e para demarcação do enxame de diques que afeta a área.

Com relação à parte de realce das imagens foi utilizado o software *Envi*TM 4.3. Nesses dados houve a realização de classificação não supervisionada e o algoritmo empregado foi o *k-means*. Nesta técnica foi utilizado o seguinte parâmetro: 4 classes e 10 iterações que são designados como centróides iniciais de grupos. Também realizou-se a classificação supervisionada que é definida como o processo no qual amostras de identidade conhecida são utilizadas para classificar pixels de identidade desconhecida (Campbell, 1996). O algoritmo empregado para a elaboração desta classificação foi o paralelepípedo.

Resultados

Gamaespectrometria

O processamento dos dados gamaespectrométricos e suas integrações com o modelo digital de terreno resultaram nos seguintes produtos: a) mapa de domínios litogeofísico (Figura 2), b) Integração da imagem entre MDT e imagem ternária RGB dos canais K/eTh/eU (Figura 3) e c) Integração de Perfil gamaespectrométrico com imagem ternária RGB (Figura 4).

A integração e a interpretação dos produtos e sua validação em campo contribuíram para a elaboração de um mapa geológico em escala de detalhe para a área de estudo (Figura 9).

A correlação entre as feições geológicas da área e sua topografia foi obtida através da análise das imagens em 2,5 D geradas com auxílio do programa *ENVI*TM 4.3, utilizando a composição ternária RGB e um modelo digital de terreno (MDT) no canal de intensidade com exagero vertical de cinco vezes. (Figura 3)

O resultado dos domínios reconhecidos após a análise do mapa de composição ternária RGB (K:eTh:eU) permitiu a visualização de dez domínios com distintas assinaturas gamaespectrométricas. (Figuras 2,3, 4 e 9)

(A) Situado na porção noroeste da área, este domínio é caracterizado pela alta concentração dos três radioelementos (K, eTh e eU) e por vezes menor concentração de K e eTh o que lhe confere a cor ciano. Ocorre em cotas mais elevadas com algumas porções com relevo moderado. Na etapa de campo relacionou-se a essa assinatura geofísica a unidade Granito Capela de São Francisco, encontrado no domínio ocidental. Essa unidade bordejia a parte ocidental da Serra e se estende

para oeste, além do limite da área, compondo dobramentos. Esse granito é leucocrático e possui granulação média a grossa e encontra-se muito deformado adquirindo localmente aspecto gnáissico. Essa assinatura gamaespectrométrica corresponde com a descrita por Dickson e Scott, 1997, no qual os mesmos associam a cor branca à resposta de granitos.

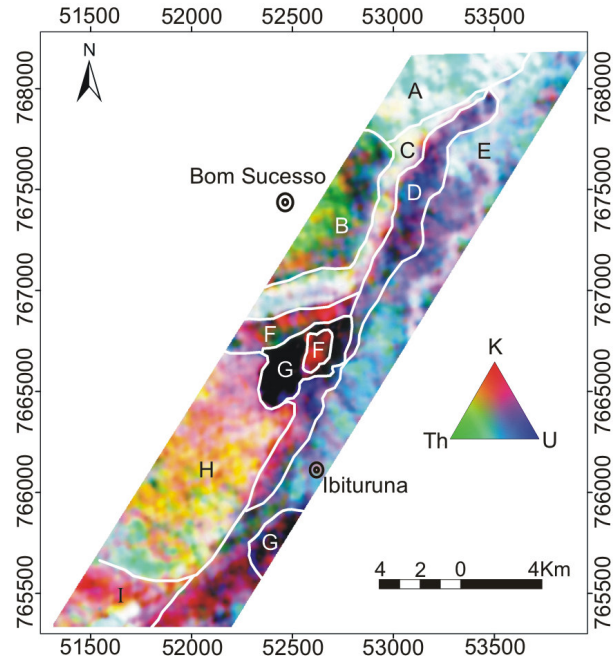


Figura 2: Domínios gamaespectrométricos sobre imagem ternária RGB (K:Th:U) demonstrando o contraste entre os radio elementos.

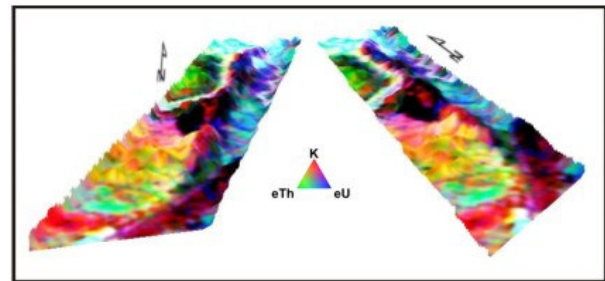


Figura 3: imagem ternária RGB (K:eTh:eU) demonstrando o contraste entre os radio elementos sobreposto ao MDT, visualização 2,5D.

(B) Situado na porção centro noroeste do polígono, este domínio é caracterizado pela alta concentração de eTh, moderada concentração de K e moderada concentração de eU. Possui relevo predominantemente arrasado. Esta assinatura geofísica foi associada à unidade Gnaiss Enderbitico. Esse se localiza na porção noroeste com formato, em planta, de corpo ovalado, Localmente, encontram-se bastante alterados e com xenólitos de rocha ultramáfica.

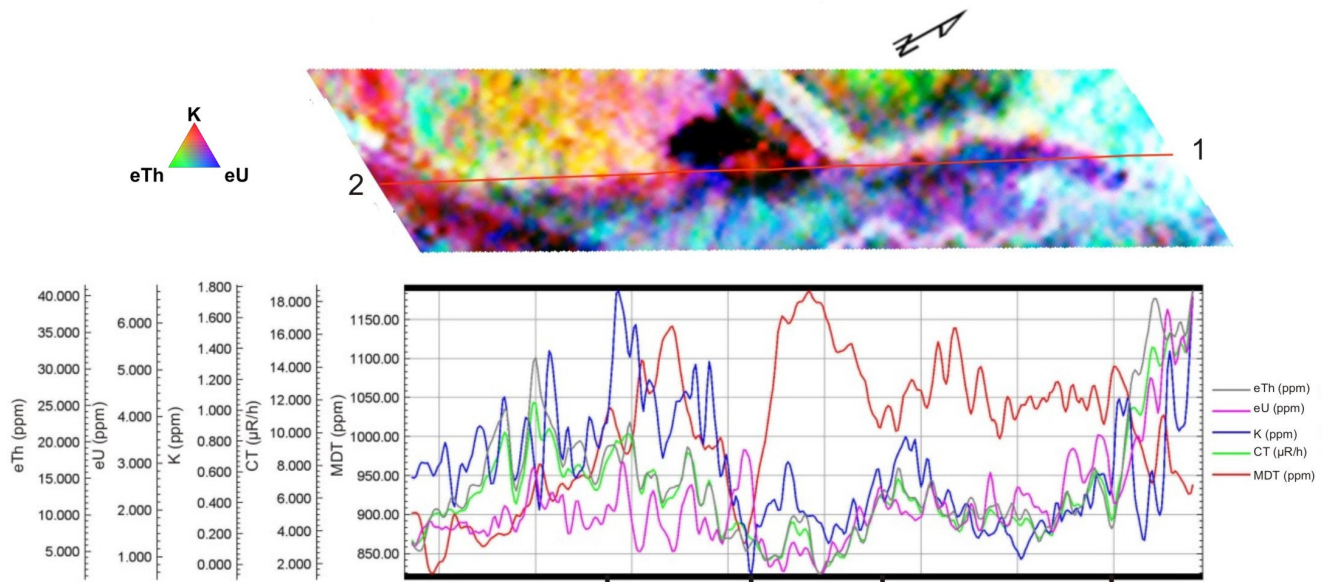


Figura 4: Perfil de aquisição sentido 1-2 demonstrando em mapa a variação lateral dos radio elementos. Os canais utilizados para o perfil radiométrico correspondem a eTh, eU, K, contagem total (CT) e modelo digital de terreno (MDT). A linha de vóo investigada para análise em perfil corresponde à linha L215200 E.

A resposta gamaespectrométrica corresponde à esperada, pois esse tipo possui mineralogia deficiente em potássio. Esse corpo foi facilmente discriminado com o uso do produto contagem total.

(C) Situado na porção centro noroeste da área, em contato com os domínios litogeofísicas B e D, este domínio é caracterizado pela alta concentração dos três radioelementos (K, eTh e eU) e está localizado em altos topográficos. Em campo este domínio litogeofísico foi associado ao Granito Capela de São Francisco anteriormente descrito (domínio A).

(D) Situado na porção central da área, em formado alongado de direção SW-NE este domínio é caracterizado pela baixa concentração dos três radioelementos (K, eTh e eU) e está localizado em altos topográficos, especificamente no topo da Serra de Bom Sucesso. Esse domínio foi caracterizado como Serra de Bom Sucesso e durante os trabalhos de campo foi individualizado em: unidade quartzito inferior, formação ferrífera bandada (Itabirito) e quartzito superior. Esse unidade possui uma assinatura correspondente com a sua mineralogia e também é descrita por Dickson e Scott, 1997.

(E) Localiza-se na porção nordeste do polígono, esse domínio é caracterizado pela alta concentração de eTh, alta concentração de eU e moderada concentração de K. Possui relevo predominantemente arrasado. Essa assinatura geofísica foi associada em campo com a unidade Tonalito Tabuões localizado no domínio Oriental. Este tonalito possui textura granoblástica, granulação variando de fina a média e pode ser leucocrático a mesocrático, foliado e localmente bandado. A resposta gamaespectrométrica corresponde à esperada para este tipo de rocha já que mesma possui mineralogia deficiente em potássio. Outro fator preponderante é sua localização em baixos topográficos lhe conferindo, por vezes, assinatura de lateritas derivadas do próprio tonalito

Tabuões, fazendo com que esta laterita possua alta concentração de eTh e eU.

(F) Está situado na porção central da área de estudo em contato com o domínio litogeofísica C e está envolvido pelo domínio G, esse é caracterizado pela concentração elevada de K, e pelas concentrações intermediária de eU e baixa de K. Localiza-se em uma região de relevo predominantemente moderado. Na etapa de campo relacionou-se a esta assinatura geofísica a unidade gnaíse migmatítico bandado. Este corresponde ao resultado da deformação de granito porfírico e o granito capela de São Francisco, esse gnaíse possui enclaves de rochas ultramáficas que podem pertencer ao Complexo Morro das Almas. A resposta gamaespectrométrica corresponde à esperada, pois granitos porfíricos possuem uma respostas alta em relação ao rádio elemento K conferindo-lhe uma coloração avermelhada em análise a composição ternária RGB (K:eTh:eU).

(G) Situado na porção central da área, este domínio é caracterizado pela baixa concentração dos três radioelementos (K, eTh e eU) e está localizado em altos topográficos. Essa assinatura geofísica também é individualizada na porção sudeste da área. Em campo tal assinatura foi associada à unidade complexo ultramáfico Morro das Almas localizado no domínio ocidental. As litologias predominantes correspondem a xistos ultramáficos. A assinatura gamaespectrométrica evidenciada e discriminada desse domínio corresponde a descrita por Dickson e Scott, 1997, para rochas ultramáficas no qual os mesmos associam a cor preta, em análise a composição ternária RGB (K:eTh:eU), a baixa concentração de todos os radioelementos. Esse corpo foi facilmente discriminado com o uso do produto CT.

(H) Encontra-se na região sudoeste, este domínio é caracterizada pela alta concentração de K, alta

concentração de eTh e concentração baixa à moderada de U. Essa assinatura não correspondeu a uma distribuição homogênea contendo por vezes variações nas cores obtidas o que representa uma variação dos elementos. Possui topografia predominantemente baixa. No campo associou-se esse domínio a unidade Granito Porfírico localizada no domínio Ocidental. O granito porfírico ocorre no extremo sudoeste da área. Ele possui granulação grossa com fenocristais de k-feldspato disposto em uma matriz granítica a granodiorítica. A assinatura gamaespectrométrica evidenciada reflete a geoquímica e mineralogia da rocha já que essa possui altas concentrações de potássio por conta dos fenocristais e por terem altas concentrações de Th por serem resultados de cristalizações tardias o que lhes conferem enriquecimento em elementos incompatíveis. Esse corpo foi facilmente discriminado com o uso do produto contagem total.

(I) Situado no extremo sudoeste do polígono, este domínio é caracterizado pela alta concentração de K e eTh e moderada concentração de eU. Possui relevo predominantemente arrasado. Essa assinatura geofísica não foi discriminada em campo, pois não houve dados geológicos para sua correlação com a assinatura geofísica.

Magnetometria

A partir da imagem da amplitude do sinal analítico foi avaliada a textura fornecida pela imagem, e o comportamento magnético da mesma. O resultado desta análise forneceu a interpretação de um relevo magnético rugoso e altamente magnético, encontrado na porção centro norte da área. Esta rugosidade é explicada pelo enxame de diques que afetam a área com orientação geral de NW e pela presença de xenólitos de rocha ultramáfica que são vistos em algumas unidades geológicas mapeadas. (Figura 6).

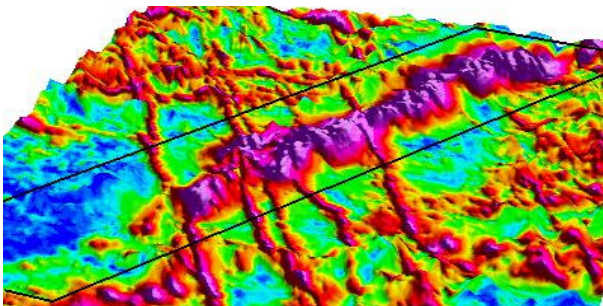


Figura 6: Integração dos mapas da amplitude do sinal analítico (ASA) sobreposto ao MDT, visualização 2,5D, polígono em preto corresponde à área de estudo.

A classificação supervisionada e não supervisionada foi realizada na imagem ASA. A primeira serviu de seleção de alvos magnéticos para mapear os corpos máficos-ultramáficos e as formações ferríferas. E segunda para separação de domínios magnéticos.

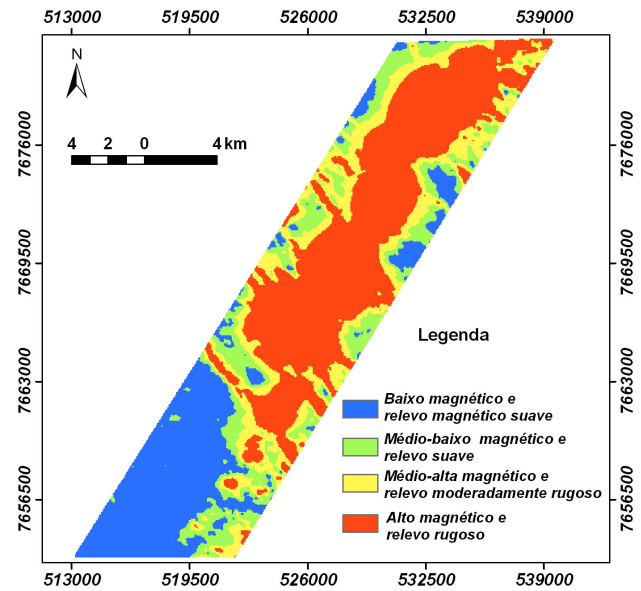


Figura 7: Classificação não supervisionada (algoritmo K-means) da amplitude do sinal analítico.

Os lineamentos magnéticos foram interpretados a partir dos mapas ISA, AGHTe Dz (Figura 8). Em campo estes dados foram associados ao enxame de diques que afeta a área na direção NW facilmente discriminados no mapa da ISA, à falha de rejeito direcional que desloca a Serra do Bom Sucesso em relação à Serra de Ibituruna, e à zona de cisalhamento de direção N30°E que divide o domínio Ocidental do domínio Oriental, caracterizada por foliação milonítica subvertical sendo a estrutura mais penetrativa e marcante observada em campo (Figura 8).

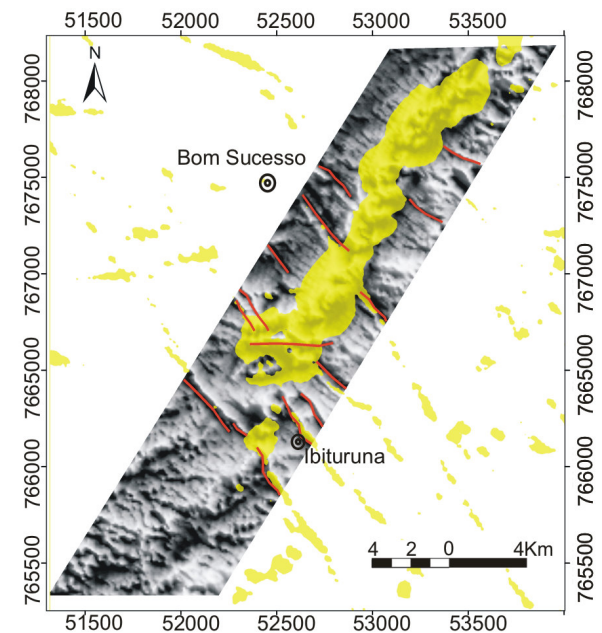


Figura 8: Mapa de classificação supervisionada dos pixels de alto magnético (resposta em amarelo) sobreposto sobre o mapa da ISA e principais lineamentos da área em vermelho.

A magnetometria também ajudou na definição dos limites de corpos ultramáficos, formação ferrífera bandada e diques. O produto da classificação supervisionada dos alvos de alto magnético, visando mapear os corpos altamente magnéticos, foi útil para delimitar esses corpos de maneira eficiente (Figura 8).

Conclusões

A geração de produtos derivados de dados aerogeofísicos de alta densidade de amostragem e suas interpretações correspondem a uma eficiente metodologia na aplicação prévia do mapeamento geológico.

As informações obtidas dos dados gamaespectrométricos permitiu a individualização de 10 domínios, dos quais 9 foram observadas em campo enquanto o domínio D corresponde às três unidades mapeadas na Serra devido ao baixo contraste radiométrico entre elas. A utilização de dados magnetométricos foram úteis na caracterização de diques, corpos máficos e ultramáficos e formação ferrífera. Integrados aos dados de mapeamento geológico tradicional mostraram ser bastante eficientes nas individualizações de unidades geológicas, do arcabouço estrutural e tectônico da Serra de Bom Sucesso.

O produto final deste projeto foi a elaboração de um mapa geológico na escala de 1:50.000 (Figura 9), nível de detalhe maior que o cartografado anteriormente na região. Isso reforça o fato de que a utilização de dados geofísicos é extremamente importante para o mapeamento de áreas intemperizadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa de Iniciação Científica da UnB/CNPq pela oportunidade de participar do projeto de pesquisa. À FAPESP processo:

2006/51931-0 pelas diárias de campo e confecção das lâminas delgadas e ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pela disponibilidade dos laboratórios. Os autores agradecem a ajuda dos geólogos Atilas Menezes e Diogo Orphão.

Referências

- Blum M.L.B.** 1999. Processamento E Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e Sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229p.
- Dickson B L & Scott K M** 1997, Interpretacion of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. AGSO Journal, 17(2): 187 – 200.
- Lasa Engenharia e Prospecções S.A.**, 2001. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, Área 2. Projeto Pitangui – São João Del Rey – Ipatinga. Volume I, Texto técnico.
- Quéméneur J. J., G. Ribeiro A., Trouw R. A. J., F. V P. Paciullo., M. Heilbron.,** 2003. Geologia da Folha de Lavras. Projeto Sul Minas – Serviço Geológico de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais e Universidade Estadual do Rio de Janeiro e Universidade Federal do Rio de Janeiro, 61 p.
- Silva A. M., Filho C. R. de S., Toledo C. L. B. & Dantas E. L.,** 2003. Amalgamation of different crustal blocks in the Southernmost Part of the São Francisco Craton constrained by airborne geophysical data, Brazil.
- Toledo, C.L.B.,** 2002. Evolução Geológica das Rochas Máficas e Ultramáficas no Greenstone Belt Barbacena, Região de Nazareno, MG. Ph. D. Thesis, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 308p.

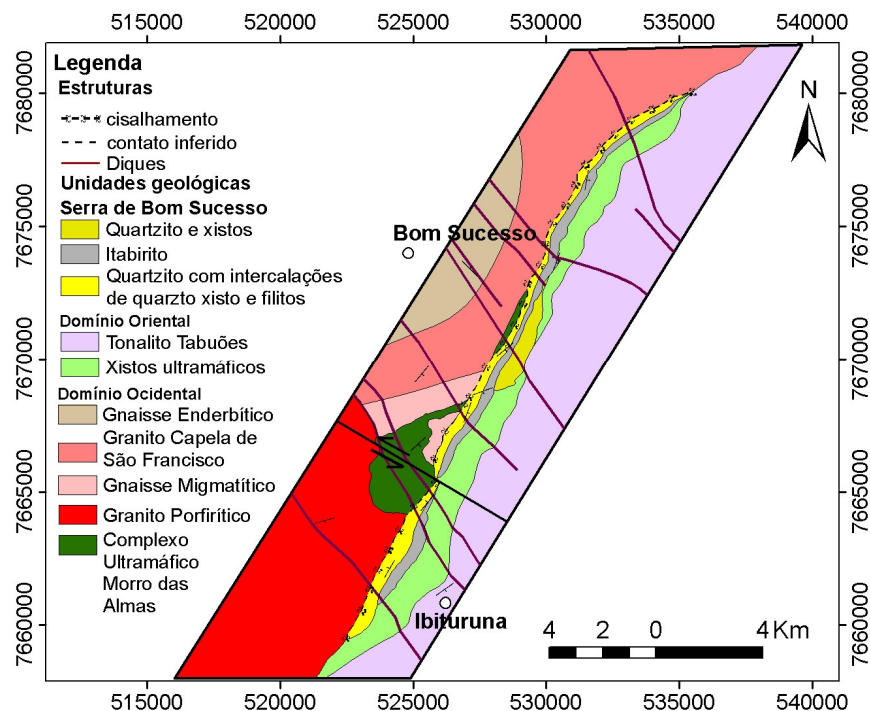


Figura 9: Mapa Geológico da Serra de Bom Sucesso e adjacências (em escala reduzida).