PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS MAGNETOMÉTRICOS AÉREOS DO PROJETO ITABIRA-FERROS, MG: UMA FERRAMENTA NO AUXÍLIO AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL

LEILA MÁRCIA MENDES CARVALHO¹, AUGUSTO CÉSAR BITTENCOURT PIRES¹,
CLAUDINEI GOUVEIA DE OLIVEIRA², ROBERTO ALEXANDRE VITÓRIA DE MORAES³
& MARCELO DE LAWRENCE BASSAY BLUM⁴

Resumo A área de Itabira-Ferros está situada na região do Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais e é conhecida pelas abundantes ocorrências de esmeraldas. A área é caracterizada por seqüências vulcanossedimentares tipo greenstone belts (Supergroppo Rio das Velhas) e seqüências ferríferas paleoproterozóicas do Supergroppo Minas inseridas dentro de corpos graníticos (Granitos Borrachudos). A formação das esmeraldas é atribuída à interação de fluidos pegmatíticos com rochas máficas-ultramáficas do Supergroppo Rio das Velhas. O presente trabalho discute as características geofísicas utilizando dados de magnetometria aérea e a integração desses dados com a geologia para auxiliar no mapeamento geológico dessa região. As análises e interpretações das imagens geofísicas sugerem a presença de três tipos de assinaturas básicas formadoras do relevo magnético: o primeiro é constituído por sinais de baixas freqüências espaciais, o segundo por médias freqüências, e um terceiro por sinais de altas freqüências espaciais. O primeiro conjunto parece indicar que suas fontes formam tendências sinuosas e contínuas dispostas em faixas na direção NE-SW nas porções norte, noroeste e nordeste. O segundo conjunto na parte central mostra um comportamento de grandes blocos falhados com orientação geral NE-SW e recortados por estruturas E-W e NW-SE. O terceiro conjunto também mostra um comportamento de grandes blocos magnéticos compartimentados (blocos geológicos falhados), com orientação WSW-ENE. As análises e interpretações estruturais dessas imagens sugerem a presença de três eventos deformacionais. O lineamento D1 representa a direção de alinhamento preferencial, NE-SW. Na região central da área, tem-se uma feição em sigmóide que, provavelmente, pode representar a zona de cisalhamento Pedra Branca, de movimento dextral. O lineamento D2 trunca os lineamentos de direção E-W, configurando, provavelmente um sistema de falhas transcorrentes de movimento sinistral, visto que alguns lineamentos D1 são deslocados por D2, isto pode ser observado no grande lineamento que cruza a área na porção central, bem como do extremo norte. Outras feições rúpteis são marcadas por direção aproximada de N40oW.

Palavras-chave: magnetometria aérea, mapeamento geológico.

Abstract *PROCESSING AND INTERPRETATION OF AIRBORNE MAGNETIC DATA FROM ITABIRA-FERROS PROJECT, MG: A TOOL SUPPORTING LITHOLOGICAL AND STRUCTURAL MAPPING.* The area covered by the Itabira-Ferros Project is located in the Iron Quadrangle, State of Minas Gerais, and is known for its emerald occurrences. The area is characterized by greenstone belts (Rio das Velhas Supergroup) and paleoproterozoic iron sequences belonging to the Minas Series, inserted in granitoid bodies (Borrachudos Granite). The development of emerald deposits is attributed to the interaction of pegmatitic fluids with mafic-ultramafic rocks of Rio das Velhas Supergroup. The present study applies geophysical characteristics, using airborne magnetic data and their integration with geology, to determine probable zones of emerald mineralization. Analysis and interpretation of geophysical images suggest the presence of three basic types of signatures composing the magnetic relief: the first composed by low spatial frequency signals, the second by medium frequencies, and the third by high spatial frequencies. The first group seems to indicate sources forming waving and continuous trends with a NE-SW general direction, in the northern, northwestern, and northeastern portions. The second group, in the central portion, shows a behavior associated with large faulted blocks with a general NE-SW orientation and crossed by E-W and NW-SE structures. The third group also shows a behavior associated with large magnetic blocks (faulted geologic blocks) with a WSW-ENE orientation. Analysis and interpretation of the mentioned images suggests the presence of three deformation events. The lineament D1 represents the preferential direction of alignment, NE-SW. In the central region of the area, there is a sigmoidal feature that, probably, may reflect the Pedra Branca shear zone, with dextral movement. Lineament D2 cuts lineaments in the E-W direction, indicating, probably, a transcurrent system of faults with a sinistral movement, indicated by D1 lineament being displaced by D2 faults, as observed in central and northern portions of the area. Other brittle structures are present in the N40°W direction.

Keywords: airborne magnetometry, geological mapping.

INTRODUÇÃO Métodos geofísicos têm como uma de suas aplicações determinarem de maneira indireta a natureza das estruturas subsuperficiais, mediante medições de campos físicos determinados por contrastes em propriedades físicas de minerais e rochas subjacentes. Isto possibilita conferir à exploração mineral uma terceira dimensão, pela capacidade de identificação de feições, não perceptíveis por outra forma. Em decorrência, configura-se hoje a geofísica como uma ferramenta básica indispensável em levantamentos geológicos (Vasconcellos *et al.*

1994). É por isto, largamente utilizada em trabalhos relacionados com mapeamento geológico e de prospecção mineral (Vasconcellos *et al.* 1994).

Assim, o campo magnético anômalo mapeia assinaturas provenientes de fontes magnéticas crustais, em geral devidas às diferentes concentrações espaciais de magnetita. Estas estão distribuídas nos volumes das diferentes litologias e/ou concentradas ao longo das descontinuidades produzidas (rupturas com/sem movimentação) como feições tectono-estruturais que sobre

1 - Laboratório de Geofísica Aplicada, Universidade de Brasília, e-mail: lmmc@unb.com.br.

2 - Universidade de Brasília.

3 - HGeo-Tecnologia em Geociências.

4 - Instituto Nacional de Criminalística (INC/DITEC/DPF).

elas se impuseram.

A magnetometria, com seu recobrimento regional, possibilita o delineamento de traços estruturais e a delimitação de diferentes litotipos discerníveis em função de suas diferentes associações com minerais magnéticos, fornecendo subsídios para a cartografia geológica.

A área de Itabira-Ferros está inserida em um contexto geológico de terrenos vulcanossedimentares de idades arqueana a proterozóica, representados por seqüências do tipo *greenstone belts*. Estas seqüências hospedam importantes mineralizações de esmeraldas, relacionadas à interação de fluidos pegmatíticos, com rochas básicas a ultrabásicas, fontes do cromo. Essa região é ideal para o desenvolvimento de trabalho para modelagem de jazimentos minerais em escala regional, uma vez que possui grande acervo de dados (geologia, aerogeofísica e prospecção mineral).

O processamento e a integração de dados têm-se tornado uma atividade essencial em programa de exploração mineral, gerando mapas potenciais, evidenciando áreas de provável exploração de bens minerais, quando comparados e avaliados relativamente às áreas em produção, ou onde há ocorrências conhecidas, tornando possível a delimitação de novas áreas como alvos potenciais.

A contribuição almejada é a de gerar novas informações úteis à prospecção de esmeralda na região de Itabira-Ferros. Para isso pretende-se utilizar técnicas de melhoria e realce sobre o conjunto de dados de magnetometria disponibilizados e da integração da informação gerada a partir desses procedimentos com o conhecimento geológico existente para a área. Objetiva-se com isso melhorar o entendimento do arcabouço geológico e a tectônica regional, bem como fornecer subsídios à prospecção mineral.

A área pesquisada tem contorno aproximadamente retangular, correspondendo a uma superfície de 4.600 km² na porção centro-sudeste do Estado de Minas Gerais (Figura 1).

CONTEXTO GEOLÓGICO A região do Projeto Itabira-Ferros está contida na Província Estrutural Mantiqueira (Almeida *et al.* 1976) e insere-se no contexto da Faixa de Dobramentos Araçuaí, MG. Ela é constituída por rochas arqueanas e proterozóicas, incluindo terrenos polimetamórficos de baixo a alto grau (Figura 2).

São representados por gnaisses TTG, com rochas máficas e ultramáficas associadas, seqüências vulcanossedimentares tipo *greenstone belts* (Supergrupo Rio das Velhas) e seqüências feríferas paleoproterozóicas do Supergrupo Minas do extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero (Schorsch 1991, Oliveira & Leite 2000). O controle estrutural é marcado, principalmente por falhas de empurrão, zonas de cisalhamento transcorrentes e dobras recumbentes.

TÉCNICAS Usando o sistema Oasis MontajTM 5.3 (Geosoft 1998), os dados de aeromagnetometria foram tratados buscando-se preservar o maior conteúdo em altas frequências possível, compatível aos parâmetros da amostragem. Com isto, pretendeu-se uma melhor qualidade na apresentação e na geração dos temas interpretativos. Para tal, foram necessários uma série de procedimentos conforme abordado a seguir.

Primeiramente buscou-se eliminar as imperfeições presentes nos dados, dessa forma gerou-se um mapa das linhas de voo, para a verificação de possíveis linhas interferentes. As linhas que apresentaram alguma superposição tiveram parte de seus fiduciais apagados, ou foram quebradas em novas linhas, permitindo manter a continuidades das linhas de voo.

Na seqüência, a aplicação de um filtro de diferença quarta, em cada perfil e sua análise individual, permitiu eliminarem-se

Figura 1: Mapa de localização do aerolevante Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG (Geomag 1996).

os ruídos (picos) remanescentes de filtragem passa-baixa unidimensional.

Os dados foram então interpolados em malha regular usando-se o método das *splines* bidirecionais. Em função do espaçamento entre as linhas de voo (500 metros), optou-se por uma célula quadrada de 200 metros de lado, sendo a malha resultante reinterpolada a uma célula de 50 metros. A correção de imperfeições devidas a desnivelamentos foi feita baseada na técnica de micronivelamento conforme Minty (1991), usando-se algoritmo desenvolvido por Blum (1999).

PROCESSAMENTO DOS DADOS Compreendeu a geração de imagens de forma a facilitar a interpretação qualitativa em termos de unidades geofísicas e de suas estruturas.

Todas as integrações que se seguiram foram feitas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), o que facilita as fases de análise e de apresentação dos resultados finais.

As principais transformações geradas compreenderam: campo magnético anômalo (CMA); espectro radial de potência; Amplitude (ASA) e inclinação do sinal analítico (ISA); continuação para cima a 1000 metros do CMA (Geosoft 1998). A análise destas informações gerou a interpretação dos resultados com a delimitação de estruturas e feições magnéticas importantes.

CAMPO MAGNÉTICO ANÔMALO (CMA) A interpretação dos dados magnéticos teve início com a análise dos sinais que compunham o relevo do campo magnético anômalo (Figura 3), com o objetivo de demarcar padrões que individualizassem unidades com comportamentos distintos e padrões de assinaturas que pudessem traduzir feições importantes (linear ou não linear).

O relevo magnético da faixa Itabira-Ferros apresenta-se bastante movimentado. Sua análise mostra que há alternâncias de fai-

Figura 2: Mapa geológico para a área em estudo (CPRM 2004).

Figura 3: Imagem do Campo Magnético Anômalo (CMA).

xas com valores negativos (azuis) e positivos (vermelhos), com tendência geral de orientação NE-SW e o comportamento das mesmas é bastante irregular.

Partindo-se da porção mais ao norte com predominância de valores mais negativos (azuis) tem comportamento bastante diferenciado do restante. Ele mostra valores variando entre -100nT a -50nT . Nota-se também, uma série de assinaturas magnéticas anômalas com direções preferenciais NE-SW, enquanto outras de direção NW-SE. Na porção nordeste há indicação de que as baixas frequências delineam uma feição dobrada (Figura 3). Essa região parece ser cortada ainda por duas feições, uma linear NW-SE e outra, não linear, aproximadamente E-W. No extremo noroeste da área, há uma feição linear de forte magnetização que corta uma série de feições de orientação E-W (Figura 3).

Na porção central da área o relevo magnético é mais suave, com ondulações de médias frequências, em torno de 50nT . O centro dessa área é recortada por uma grande feição com assinatura mais baixa, 5nT e orientação geral SSW-NNE. No topo dessa feição é possível observar um grande lineamento com orientação E-W cortando o mesmo, com deslocamento para oeste (Figura 3). A porção centro-oeste da área mostra ser formado por uma mistura de sinais de baixas e de altas frequências espaciais. É possível ob-

servar ainda duas feições que lembram dobras, uma menor mais a NW e outra maior mais a SW desta área (Figura 3).

Na parte sul, o relevo magnético mostra dois comportamentos distintos. O mais a sul é marcado por assinaturas com valores negativos (fontes mais profundas), mostrando vales com orientação WSW-ENE (em tons de azul). Já na porção mais a norte dessa região o relevo é formado por uma série de picos fortemente marcados que se destacam de toda a área, de comprimentos de ondas positivos (vermelhos) de aproximadamente 200nT , porém de característica superficial (Figura 3). Na porção sudeste deste bloco as duas feições aparecem como que intrincadas formadas por assinaturas de feições lineares compostas por sinais de altas e baixas frequências com orientação geral WSW-ENE.

ESPECTRO DE POTÊNCIA PONDERADO RADIALMENTE

O espectro de potência ponderado radialmente da área de estudo é mostrado na figura 4. Para essa região, a frequência de Nyquist encontra-se em 0,5 ciclos por km. Porém, as retas se ajustaram ao espectro de potência das fontes superficiais até o número de 1 ciclo por km (Figura 4a).

O espectro indica também a presença de quatro fontes magnéticas facilmente distinguíveis da esquerda para a direita.

A primeira parte, reta 1, representa as fontes infracrustais (as mais profundas), com média em torno de 5 km de profundidade (Figura 4b), e correspondem nos mapas aos maiores comprimentos de onda. A segunda parte (reta 2) reflete as fontes médias intracrustais de comprimento de onda intermediários com profundidade de aproximadamente 2 km. A terceira parte (reta 3) corresponde a fontes supracrustais com profundidades em torno de 0,5 km e a reta 4 às fontes superficiais.

INTERPRETAÇÃO DAS ESTRUTURAS MAGNÉTICAS

A interpretação dos lineamentos magnéticos (Figura 5) permitiu observar a distinção de vários eventos estruturais magnéticos e foram demarcados aqueles que puderam ser traduzidos em assinaturas devidas às deformações que afetaram a região.

Na parte norte predomina alinhamentos orientados nas direções NE-SW e, secundariamente, NW-SE (Figuras 5 e 6). A norte desta área aparece outro sistema com orientação E-W. Um outro sistema também é observado com direção NW-SE. Este sistema mostra um leve deslocamento pelos conjuntos de estruturas NE-SW e E-W.

Na região central predomina o sistema orientado NE-SW, cortado por outros menos abundantes, principalmente segundo as direções NW-SE e E-W (Figuras 5 e 6). Na parte central dessa área tem-se um sigmóide que se encontra cortado por outras feições lineares de direção E-W. O que se observa nessa sigmóide é que as feições lineares de direção E-W vão mudando de orientação E-W para NE-SW a partir da porção central em direção a sua porção norte.

Na porção superior desse sigmóide há uma outra feição linear de direção E-W deslocando todo esse sigmóide para a direita, num movimento para oeste. Na parte oeste dessa área ocorre uma feição que tem forma de uma dobra e acompanha toda a sinuosidade do sigmóide. Na parte leste da região central, há uma série de feições de direção NW-SE que corta todo o centro da área. Na região das principais mineralizações de esmeralda a área é levemente arqueada com vergência para NNW.

Na porção sul da área predomina o sistema orientado WSW-ENE. O sistema segundo NW-SE também está presente, porém com manifestação mais discreta (Figura 5). O que chama a atenção nessa região é uma grande feição linear que corta toda a área com direção NW-SE e que separa dois tipos de relevo, um mais enrugado, centro-sul, e outro mais liso, sul-sudoeste.

O resultado (Figura 7) mostrou uma situação onde estes aparecem alinhados em várias direções nos quadrantes NW e NE.

CARACTERIZAÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

Para obter os domínios magnéticos tentou-se isolar as assinaturas de alta frequência espacial, que representa as fontes magnéticas mais rasas daquelas mais profundas. Uma forma de obter esta assinatura foi pela diferença entre os valores do campo magnético anômalo e sua versão continuada a 1000 metros de altura (Figura 8) e a utilização da amplitude do sinal

A partir da porção norte observa-se que aquelas feições com comprimentos de ondas maiores delimitados nos domínios profundos aqui se mostram mais magnéticos do que as assinaturas das fontes mais profundas. Já aqueles conjuntos de assinaturas lineares que dominam a parte central e norte da parte norte se mostram mais profundos.

Na região central o relevo se mostra mais suave e monótono, com exceção da feição em forma de sigmóide que corta todo o centro da área e pequenas feições que ocorrem no centro-leste desse bloco.

Já a parte sul da área mostra feições com uma profundidade maior que as demais regiões da área, principalmente a feição do centro-sul da mesma que é bem marcada por uma estrutura de

Figura 4: Espectro de potência ponderado radialmente para o campo magnético anômalo. Foram obtidos quatro fontes principais: a 1ª encontra-se a aproximadamente 5.000 metros de profundidade, a 2ª a 2.000 metros, a 3ª a 500 metros, enquanto que a 4ª está a 150 metros, representando a altura do voo.

Figura 5: Imagem da Inclinação do Sinal Analítico do CMA

Figura 6: Imagem da amplitude do sinal analítico somado a imagem da inclinação do sinal analítico (ASAcinza + ISAcor).

direção NW-SE e separa visivelmente esse bloco do restante da área (Figura 9).

A observação da disposição das assinaturas anômalas de alta frequência espacial permite verificar o comportamento estrutural das feições magnéticas que formam o relevo magnético mapeado (Figuras 10 e 12). No bloco norte observa-se um entremeado de feições que vem desde o bloco central e adentra neste, algumas feições apresentam movimentos para NE e outras continuam para N. No extremo WNW deste bloco uma feição linear é identificada. Essa feição é recortada por uma série de feições sinuosas com orientações E-W. Aquela feição delimitada ao norte por uma anomalia com forte susceptibilidade magnética também é identificada aqui. Além daquelas feições de orientação E-W que cortam as feições sinuosas WSW-ENE. Vale ressaltar que no centro da área, essa feição E-W verge para leste, sendo cortada por aquelas que vem do bloco central.

Na parte NE do bloco norte ocorre uma feição semelhante a uma ferradura, com a abertura voltada para SW (Figuras 9 a 13). Na imagem do CMA (Figura 3) essa feição tem a forma de uma pequena dobra. Outras feições de direção NW-SE também cortam a área. A figura 13 mostra o mapa interpretado para as unidades magnéticas e os domínios foram assim sumarizados:

Figura 7: Mapa das estruturas magnéticas lineares interpretadas a partir de todas as imagens magnéticas. A tendência predominante encontra-se com direção NE-SW, cortados por feições E-W. Já a direção NW-SE é apresentada como evento posterior aos dois primeiros, pois em corta os mesmos em vários locais da área.

DR1: Caracterizado por assinaturas muito baixas e tem **grande representatividade em área**. Esse domínio encontra-se intimamente associado com todos os domínios.

DR2: Caracteriza-se por assinaturas baixas e ocorre bordejando o domínio profundo DR1.

DR3: Esse domínio é composto por assinaturas médias e tem grande extensão em área.

DR4: É caracterizado por assinaturas variando de alta a muito alta.

CONCLUSÃO A forma de processamento discutido, as análises das informações geofísicas realizadas foram os parâmetros mais importantes para a obtenção de um mapa geofísico. A metodologia torna-se apropriada para obter diferenciações de litotipos, continuidades de lineamentos e de domínios com características geofísicas diferentes. Essas diferenças observadas são baseadas nas respostas devidas às propriedades físicas contrastantes, nas características próprias de investigação do método e, logicamente, nos realces conseguidos com a forma

Figura 8: Imagem da intensidade do CMA continuado a uma altura de 1000 metros

Figura 9: Imagem da Amplitude do Sinal Analítico de ordem zero.

de processamento.

A imagem do CMA e seus produtos derivados, continuação ascendente a 1000 metros, amplitude e a inclinação do sinal analítico apresentaram a melhor utilidade na caracterização de lineamentos, domínios e fontes magnéticas.

A partir da inclinação do sinal analítico foi possível determinar lineamentos de direção WSW-ENE, E-W e NW-SE. De acordo com o arcabouço estrutural conhecido na literatura (Uhlein 1991), os lineamentos WSW-ENE são atribuídos a um evento mais antigo, provavelmente Transamazônico, marcado pela abertura do processo de rifte na região e por uma compressão E-W. Os lineamentos D2 são atribuídos ao Ciclo Brasileiro (900 a 600 Ma) ou mesmo reativados nessa fase, gerando as estruturas com direção aproximadamente N40W (Uhlein 1991).

Agradecimentos Gostaria de agradecer ao CNPq pelo apoio financeiro, à CPRM/DNPM pelo fornecimento dos dados. Aos Professores Augusto César B. Pires, Claudinei de Oliveira Gouveia, Roberto Alexandre Vitória de Moraes e Marcelo de Lawrence Bassay Blum pela orientação no desenvolvimento desse trabalho.

Figura 10: Imagem da Derivada Vertical de Ordem Zero.

Figura 11: Imagem do Gradiente Horizontal Total de ordem zero.

Figura 12: Imagem da amplitude do sinal analítico somado a imagem da inclinação do sinal analítico (ASAcor + ISAcinza).

Figura 13: Domínios magnéticos interpretados a partir das fontes rasas. A unidade DR1 representa uma assinatura magnética muito baixa. A unidade DR2 possui assinatura baixa, enquanto que a DR3 tem assinatura média e a DR4 assinatura variando de alta a muito alta. altura de 1000 metros

Referências

- Almeida F.F.M. 1976. O Cráton do São Francisco e suas faixas marginais de dobramentos. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto, *Resumos Expandidos*, 241-215.
- 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*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 229p.
- CPRM 2004. *Mapa Geológico do Brasil*. CPRM. Rio de Janeiro. Geomag 1996. Projeto Gemas de Minas Gerais, Itabira-Ferros, no Estado de Minas Gerais. CPRM- GEOMAG S.A., 6v.
- Geosoft 1998. *OASIS Montaj 4.2*. GEOSOFT, Inc. Toronto.
- Minty B.R.S. 1991. Simple Micro-Levelling for Aeromagnetic Data. *Expl. Geoph.* 22:591-592.
- Oliveira A.A.K. & Leite C.A.S. 2000. *Folha Ipatinga, Estado de Minas Gerais, Folha SE.23-Z-D-II. Escala 1:100.000* (mapas, textos e anexos). CPRM, Belo Horizonte, 51p.
- Schorscher H.D. 1991. Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional. In: Congresso Brasileiro de Geoquímica, 3, Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 1, São Paulo, *Guia de Excursões*, 37 - 87.
- Uhlein A. 1991. *Transição Cráton - Faixa Dobrada: um exemplo do Cráton São Francisco e da Faixa Araçuai (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 295p.
- Vasconcelos R.M., Metelo M.S., Mota A.C. & Gomes R.D. 1990. *Geofísica em Levantamentos Geológicos*. Rio De Janeiro, DIGEOF-CPRM.

Manuscrito A-1600

Revisão aceita em 20 de outubro de 2006