



Aeromagnetometria como uma ferramenta para prospecção de esmeraldas, região de Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero (MG).

Rodrigo Malheiros Pontes *, Marcelo de L. Bassay Blum, Augusto César B. Pires, Roberto A. Vitória de Moraes ,
Universidade de Brasília – Laboratório de Geofísica Aplicada.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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 Itabira-Ferros region is situated at the Quadrilátero Ferrífero, state of Minas Gerais, and it is known for the abundant occurrence of emerald. The area is characterized for volcano-sedimentary sequences inserted within granitic bodies. The formation of emerald is attributed to the interaction of pegmatitic fluids with mafic and ultramafic rocks. This paper aims to map and identify geological features utilizing aeromagnetometric data, and through the integration of the products generated with geological data, to determine zones of probable mineralization.

The processing of aeromagnetometric data utilizing the software Geosoft allowed the creation of images of the magnetic field, amplitude of the analytical sign and phase of analytical sign. The analysis and interpretation of these images exhibited the presence of at least two deformational events, which generated a important horse tail structure and several magnetic lineaments, probably related to thrusts and shear zones. The creation of a magnetic dominium map, grouping rocks of similar magnetic behaviour, permitted the association of these dominia with the geological map. The integration of these products permitted the determination of zones of interaction of the granitic bodies with mafic and ultramafic rocks, which possibly consist in zones of mineralization of emeralds.

Introdução

O avanço tecnológico e científico tem permitido cada vez mais um aperfeiçoamento e refinamento de técnicas e ferramentas analíticas, aplicadas para o tratamento e integração de dados geofísicos de naturezas diversas. Atualmente, processos de integração de dados têm se tornado uma atividade essencial de qualquer programa de exploração mineral. Desta forma, áreas com jazimentos minerais são utilizadas como modelos iniciais, fornecendo atributos necessários a verificação de um modelamento em escala regional. Esta técnica gera, como produto final, mapas potenciais, evidenciando áreas de provável exploração de bens minerais, que uma vez comparados e avaliados com áreas em produção, ou ocorrência conhecida, torna possível a delimitação de novas áreas com alvo potencial, onde ocorrências não são ainda conhecidas ou avaliadas.

A região do Quadrilátero Ferrífero (MG) pode ser considerada como área chave para o desenvolvimento deste tipo de trabalho, em virtude de seu grande acervo de dados (geologia básica, aerogeofísica e dados de prospecção geoquímica). A área de estudo do presente trabalho, Região de Itabira-Ferros, está inserida em um contexto geológico de terrenos vulcano-sedimentares de idades arqueana a proterozóica, representadas por seqüências do tipo 'greenstone belts'. Estas seqüências apresentam importantes mineralizações de esmeraldas, relacionadas com a interação de fluidos pegmatíticos, com rochas básicas e ultrabásicas.

O trabalho em questão objetiva identificar e mapear estruturas geológicas, utilizando dados de magnetometria aérea, buscando contribuir para uma melhor compreensão da tectônica regional. Além disso, busca desenvolver e aplicar técnicas de integração de dados para gerar de imagens digitais convenientes para interpretação geológica. Por fim, estudar as relações espaciais entre variáveis geológicas obtidas de dados de imagens integradas e ocorrências de esmeraldas conhecidas, para produzir mapas evidenciando áreas favoráveis à exploração de novos depósitos.

A área do presente trabalho esta localizada na porção centro-oeste do estado de Minas Gerais, inserida na Folha topográfica SE.23-Z-D (Ipatinga) apresentada na escala 1:250.000, e delimitada pelas coordenadas: a- 19°50'06" 43°26'20", b-18°52'14" 42°59'50", c- 19°08'55" 42°45'29" e d- 20°06'47" 43°12'06". Os dados de aeromagnetometria são provenientes do Projeto Gemas de Minas Gerais (levantamento aéreo magnetométrico e gamaespectrométrico da faixa Itabira-Ferros) realizado pela Geomag.

Contexto Geológico

A área de estudo é constituída por rochas de idades arqueanas e proterozóicas, incluindo terrenos polimetamórficos de baixo a alto grau além de rochas xistosas inseridas na seqüência vulcano-sedimentar e metassedimentos do extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero (Schorscher, 1991).

Na região de Itabira-Ferros são descritos corpos graníticos (Granitos Borrachudos) e gnássicos pertencentes ao Complexo Granítico-Gnássico. Encaixados nestes corpos ocorrem rochas xistosas, por vezes gnássicas, pertencentes a uma seqüência vulcano-sedimentar interpretada como uma continuação dos 'Greenstone Belts' Rio das Velhas (Figura1). Além destes são descritos importantes veios de quartzo, concordantes ou não com estruturação geral, e corpos pegmatíticos, restritos a regiões proximais as rochas do complexo. Estes litotipos estão deformados e metamorfizados no fácies xisto verde alto a anfíbolito,

sendo seu controle estrutural marcado, principalmente, por falhamentos de empurrão, zonas de cisalhamento torçorante e dobramentos apertados.

As mineralizações descritas na região estão inseridas em terrenos vulcano-sedimentares de idade arqueana a proterozóica, representados por seqüências do tipo 'greenstone belt' (Rio das Velhas) em que a formação das esmeraldas deve-se à interação de fluidos pegmatíticos, provenientes dos Granitos Borrachudos, com as rochas básicas e ultrabásicas. Tais rochas originaram, durante processos metamórficos, os tipos xistosos (biotitas/flogopitas xistos, ou biotititos/flogopititos) que hospedam esses minerais (Giuliani *et al.*, 1997).

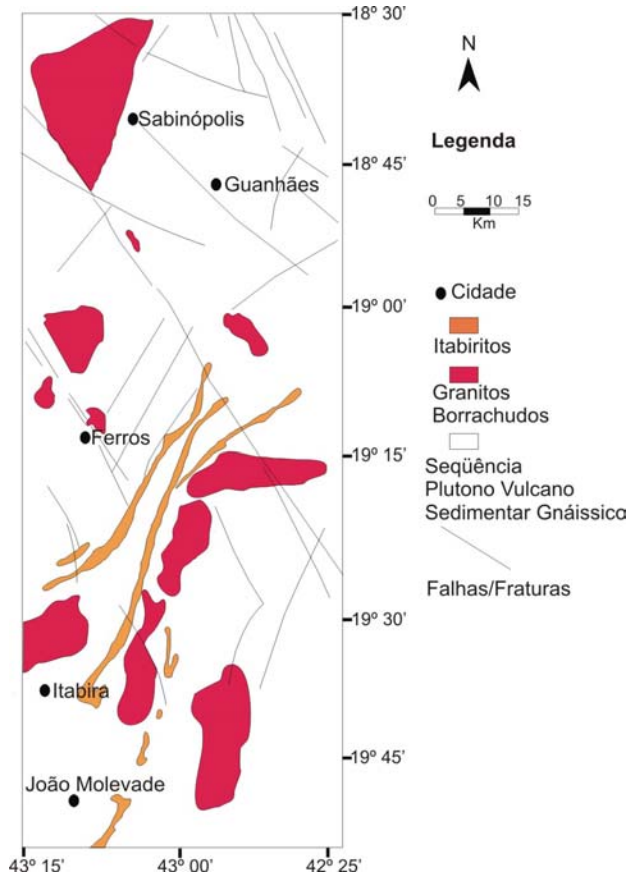


Figura 1 – Mapa litológico representando os principais maciços de Granitos Borrachudos e as lentes da Seqüência Vulcano-Sedimentar encontradas no Cinturão Esmeraldífero do Estado de Minas Gerais (modificado de Fernandes *et al.*, extraído de Carvalho, 1999).

Metodologia

A partir da utilização do software Geosoft, os dados de aeromagnetometria foram tratados buscando-se obter uma melhor qualidade de apresentação em mapa, e posteriormente integrados gerando mapas adequados para posterior interpretação. Para tal, foram necessários uma série de procedimentos que tiveram início com a filtragem dos dados.

Primeiramente buscou-se eliminar as imperfeições (ruídos) presentes, desta 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 continuidade das linhas de voo.

O procedimento de filtragem das linhas de voo tem como objetivo eliminar as influências de fenômenos, naturais ou não, das medidas de campo. Com a filtragem, tenta-se separar efeitos superficiais, alta freqüência (compactação, intemperismo, contatos geológicos, feições estruturais), efeitos profundos, baixa freqüência (espessura da crosta, feições geológicas regionais, profundidade de desmagnetização) e efeitos intermediários (normalmente aplicados a prospecção mineral) (Blum, 1999). Inicialmente foi aplicado um filtro passa-baixa para que fossem eliminadas as altas freqüências, normalmente atribuídas a ruídos superficiais. Posteriormente, foi aplicado um filtro não linear, onde, se o comprimento de onda de uma feição é menor que o tamanho limite especificado pelo filtro, e sua amplitude ultrapassa o valor de tolerância, a feição é removida e substituída por valores interpolados baseados nos vizinhos adjacentes, desta forma são eliminados os ruídos (Geosoft, 1999). Buscando o refinamento da filtragem dos dados, foram gerados perfis dos valores filtrados para cada linha de voo. Conjuntamente com a aplicação de um filtro de diferença à quarta, que consiste na substituição do valor de um ponto de uma linha de voo pela diferença entre o segundo ponto anterior e o segundo posterior ao ponto em questão, cada perfil foi analisado individualmente, sendo eliminados os ruídos (picos) remanescentes.

Os dados foram então interpolados em uma malha regular utilizando o método da curvatura mínima. O mapa de dados interpolados apresentou uma forte influência das linhas de voo, sendo necessário a efetuar um micronivelamento destes dados, visando eliminar os efeitos decorrentes de nivelamento insuficiente. A técnica consiste na aplicação de filtros simples e distintos em duas direções ortogonais de uma malha (ao longo das linhas de voo e de controle). Após uma série de tentativas com diversos 'scripts' de micronivelamento de *Minty* modificado por Blum (1999), não foram obtidos resultados satisfatórios, por isso optou-se pela aplicação de filtros, sendo os melhores resultados obtidos a partir da aplicação de um filtro de convolução simétrica 5x5, com filtro pré-definido de mínimos quadrados, com uma célula unitária de 250m.

Por fim, foram gerados três mapas:

- 1 - Mapa do campo magnético anômalo - ilustrando a susceptibilidade magnética dos corpos presentes na área;
- 2 - Mapa da amplitude do sinal analítico - importante na determinação de parâmetros geométricos, como localização de limites (geológicos e estruturais) e profundidades de corpos. O mapa é gerado através de uma série de métodos automáticos ou semi-automáticos baseados na aplicação de derivadas horizontais e verticais, que realçam os gradientes nas bordas de corpos magnéticos;

3- Mapa da fase do sinal analítico- importante para a observação de feições estruturais, pois permite a estimativa do mergulho da fonte causativa e, conseqüentemente, o contraste local de susceptibilidade, em uma extensão da teoria do sinal analítico (Thurston & Smith, 1997).

Os mapas gerados através foram, então, transferidos para o software Arcview para a integração dos dados. Primeiramente, criou-se um mapa de domínios magnéticos, delimitando desta forma os corpos com resposta magnética similar. Feito isto, foram identificadas as principais feições estruturais observadas na área de trabalho, e sua cronologia. Por conseguinte, com base no mapa de domínios magnéticos, 'overlay' de feições estruturais e locais de jazimento mineral de ocorrência de esmeralda conhecidos, foram delimitadas áreas de possível ocorrência de esmeralda.

Resultados

A interpretação e integração dos mapas resultantes do tratamento dos dados aeromagnéticos está fundamentalmente embasada na análise qualitativa destes produtos, onde procurou-se, por meio da integração entre interpretação geofísica, geológica e ocorrências de zonas mineralizadas em esmeraldas conhecidas, definir um arcabouço estrutural para a área de pesquisa, gerar um mapa 'magneto-geológico' e determinar zonas potenciais para mineralização de esmeralda.

Arcabouço Estrutural

A interpretação do contexto estrutural se deu a partir da análise dos mapas de campo anômalo, amplitude do sinal analítico e fase do sinal analítico (Figuras 2, 3 e 4, respectivamente), sendo gerado um mapa de lineamentos estruturais (Figura 5) como produto desta interpretação.

A interpretação do mapa de lineamentos a luz da geologia local permitiu a distinção de, ao menos, dois eventos estruturais distintos, responsáveis por duas direções de lineamentos: f_n e f_{n+1} . O lineamento S_n está relacionado com estruturas com alinhamento preferencial na direção NE-SW, associado a uma feição sigmoidal que, provavelmente, configura uma zona de cisalhamento, de movimento dextral, formando uma estrutura de desfiamento ('horse tail'), caracterizada por segmentos imbricados de falhas de rejeito direcional sub-paralelas, curvas e oblíquas ligadas a falha mestra em uma de suas terminações. Podem estar associadas a esta estrutura, falhas de cavalgamento, com direção aproximada E-W. O lineamento f_{n+1} trunca os lineamentos de direção NE-SW, e é marcado por feições com direção aproximada de N40W, configurando, provavelmente um sistema de falhas transcorrentes de movimento sinistral, posto que lineamentos S_n são deslocados por lineamentos S_{n+1} .

A interpretação do arcabouço estrutural esta de acordo com a literatura, sendo os lineamentos S_n atribuídos ao Evento Transamazônico (2.6 - 2.0 Ga), marcado por uma série de processos sedimentares, tectônicos e magmáticos, ilustrados pela evolução do Supergrupo Minas (Marshak, Alkimim & Jordtevelista, 1989), e

marcados por uma compressão E-W. Os lineamentos S_{n+1} são atribuídos a deformações do Ciclo Brasileiro (900 a 600 Ma), ou mesmo fases posteriores do Evento Transbrasiliano, gerando estruturas com direção N40W aproximada, configurando possíveis falhamentos transcorrentes (lineamentos f_n são deslocados por lineamentos f_{n+1}), ou mesmo falhas de empurrão e dobramentos.

Domínios Magnéticos

Os domínios magnéticos foram caracterizados, fundamentalmente, a partir da análise dos mapas de campo magnético anômalo e amplitude do sinal analítico (Figuras 2 e 3, respectivamente), atentando-se ao tipo de anomalia, arranjo espacial das anomalias e ao padrão característico de cada domínio. Disto resultaram quatro grupos distintos: Grupo I – corpos que apresentam respostas magnéticas mais fortes, define com clareza estruturas e unidades geológicas; Grupo II – apresentam respostas fortes, contudo inferiores ao grupo anterior, são áreas correlacionáveis com possíveis unidades geológicas ou, podem estar delimitando unidades geológicas; Grupo III – possui pequena resposta magnética, possivelmente não apresenta formas correlacionáveis com a geologia da área; Grupo IV – grupo de menor resposta magnética, reflete a ausência ou rara presença de anomalias de alta frequência.

A comparação do mapa de domínios magnéticos, com o mapa geológico da área em questão, permitiu uma caracterização refinada destes domínios magnéticos, atribuindo a estes possíveis unidades litológicas correspondentes: Grupo I – corresponde a rochas do Supergrupo Rio das Velhas (metassedimentos vulcanoclásticos e clásticos), Grupo Itabira (formação ferrífera, dolomitos e calcários), rochas metabásicas e ultrabásicas, Granitos Borrachudos e possivelmente rochas do embasamento; Grupo II – corresponde à borda de corpos do Grupo I com menor resposta magnética, ou possíveis corpos pegmatíticos associados; Grupo III e IV – sua baixa resposta magnética pode estar caracterizando rochas da seqüência de paragneisses (paragneisses, metaarcóseos, metagrauvas e mica-xistos).

Zonas de Mineralização de Esmeraldas

As mineralizações de esmeralda conhecidas ocorrem inseridas em áreas com ocorrência da Seqüência Vulcano-Sedimentar em contato falhado com os Granitos Borrachudos, onde a interação de fluidos metassomáticos provenientes de zonas de cisalhamento dúctil-rúptil promovem a mineralização das esmeraldas. Em alguns casos, as esmeraldas podem estar associadas a veios pegmatíticos quartzo-feldspáticos. Desta forma, a partir da análise do mapa de lineamentos estruturais, do mapa de domínios magnéticos, de ocorrências minerais conhecidas e corpos graníticos do tipo Granito Borrachudo, procurou-se determinar áreas potenciais para mineralizações (Figura 7). A determinação destas zonas foi baseada na inferência de falhamentos, tidos como de suma importância na facilitação do transporte de fluidos metassomáticos, que cortam estes corpos graníticos e se prolongam até cortar corpos de rochas ultramáficas, causando a mineralização

dos mesmos, conforme pode ser observado nos jazimentos conhecidos. Como pode ser observado na figura 7, isto ocorre nas bordas dos domínios magnéticos do Grupo I em contato com o Grupo II. Portanto as zonas potenciais são proximais a estas feições. No caso de mineralizações que ocorrem em corpos pegmatíticos, que são menos freqüentes (garimpo de Capoeirana), os critérios adotados foram similares, zonas proximais a falhamentos permitindo a interação de fluidos metassomáticos com fluidos provenientes de rochas ultramáficas, tidos como portadores de elementos cromóforos das esmeraldas da região.

Conclusões

A utilização de dados de aeromagnetometria como uma ferramenta de auxílio na prospecção de esmeraldas na região do Quadrilátero Ferrífero se mostrou bastante eficiente. A indicação de importantes feições estruturais e litotipos relacionados com a mineralização desta gema permite a determinação de novos alvos a serem pesquisados e conseqüentemente a ampliação das zonas produtoras. Por fim, forneceu informações sobre a estruturação regional da área permitindo um maior conhecimento sobre sua compartimentação e evolução, podendo esta técnica ser aplicada em outras regiões.

Agradecimentos

Os autores prestam sincero agradecimento aos professores, alunos e funcionários do Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília, pelo apoio e discussões.

Referências

- Blum, M., 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 nº 30 (IG/UnB), 229p.
- Briggs, I. C., 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**(1):39-48.
- Carvalho, L.M.M., 1999. Aspectos Mineralógicos, Geoquímicos e das Inclusões Fluidas das Esmeraldas e Águas-Marinhas das Minas Canta Galo (Nova Era) e Belmont (Itabira), Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado (UFOP), 159p.
- Geosoft 1994. *GEOSOFT MAGMAP 2-D-frequency domain processing*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Geosoft 1995. *GEOSOFT mapping and processing system*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Geosoft 1996. *GEOSOFT MAGMAP 2-D-frequency domain processing*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Geosoft 1998. *Oasis Montaj 4.2*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Geosoft 1999. *Oasis Montaj 4.2*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Giuliani G.; Ribeiro-Althoff, A. M.; Cheilletz.A.; Feraud,G.; Barbosa-Camacho, G.; Zimmermann,J. L.,1997. Ar and K-Ar geochronological evidence for two periods (approximately 2 Ga and 650 to 500 Ma) of emerald formation in Brazil. *International Geology Review*. 39;

10, Pages 924-937. Winston & Son. Silver Spring, MD, United States.

Keckler, D., 1994. *Surfer® for windows. User's Guide*. Golden Software, Inc.

Marshak, S.; Alkmin, F.F. ; Jordtevangalista, H.,1992. Proterozoic Crustal Extension and the generation of Dome-and-Keel Structure in an Archean Granite Greestone Terrane. *Nature* 1992, Vol 357, Iss 6378, pp 491-493.

Schorscher, H.D., 1991. Komatiitos na estrutura greenstone belt Série Rio das Velhas.Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. XXX Congr. Brás. Geol., Anais...Recife.

Swain, C. J., 1976. A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. *Computers & Geosciences*, **1**:231-240.

Thurston & Smith, 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method. *Geophysics*. 62; 3, pp 807-813. 1997.

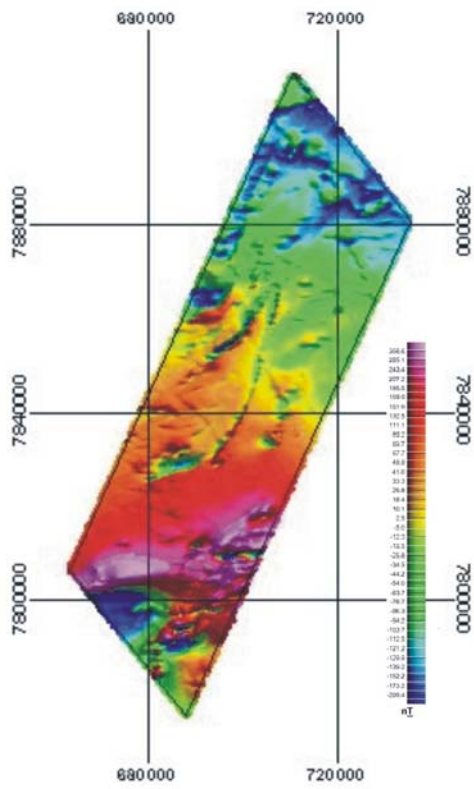


Figura 2 – Mapa do campo magnético anômalo.

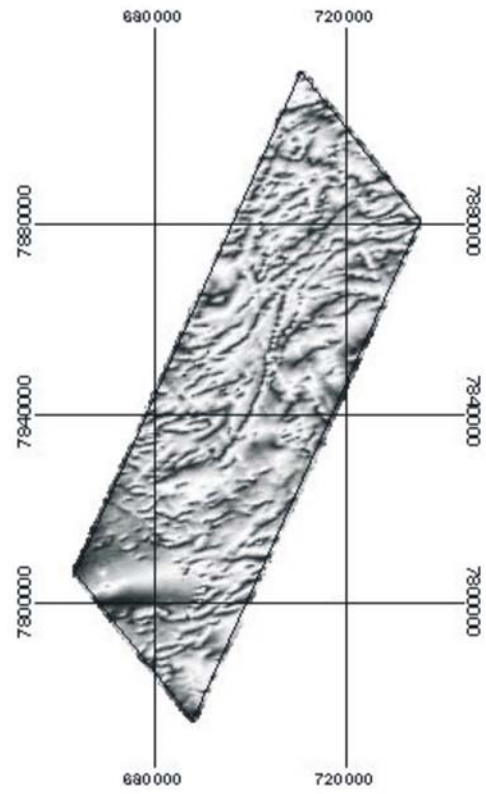


Figura 4 – Mapa da fase do sinal analítico.

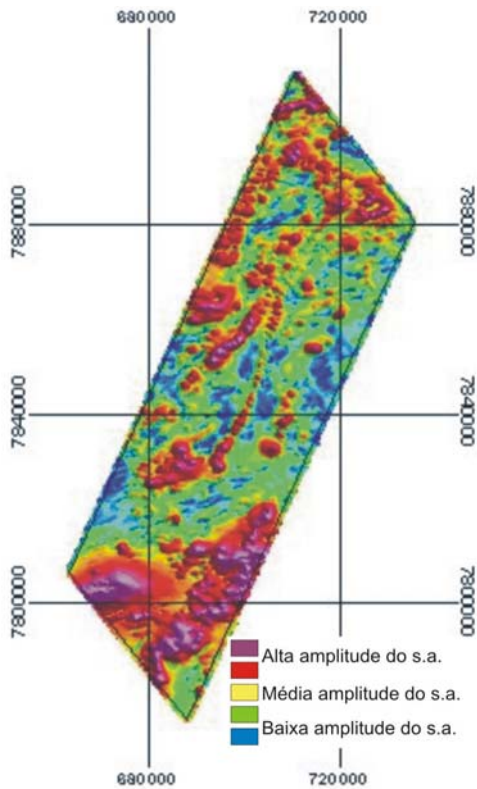


Figura 3 – Mapa da amplitude do sinal analítico.

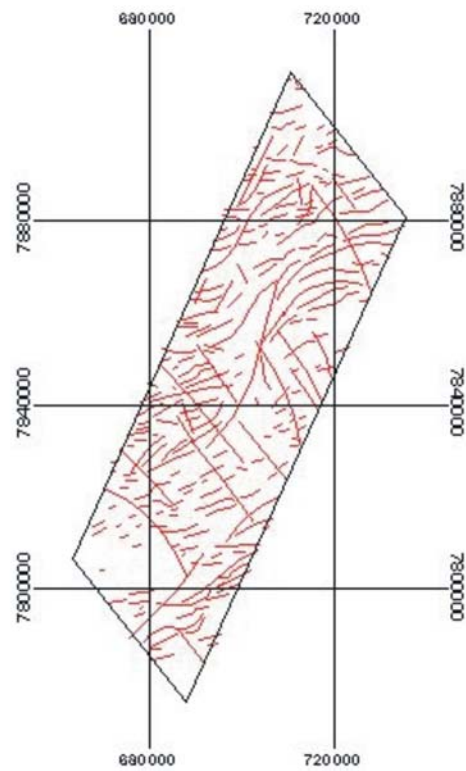


Figura 5 – Mapa de lineamentos magnéticos.

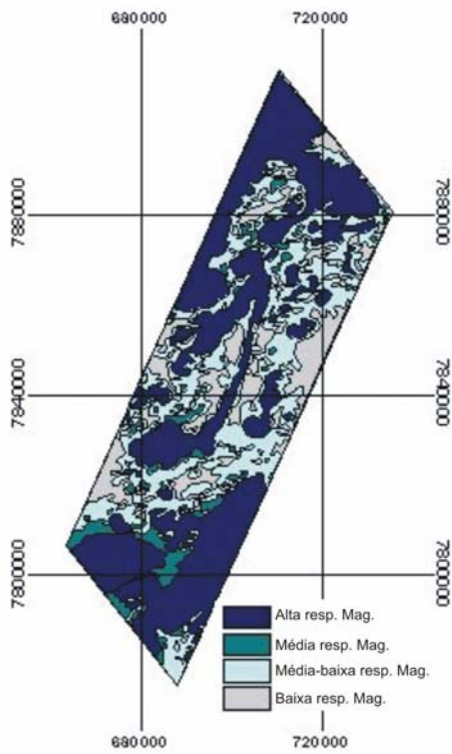


Figura 6 – Mapa de domínios magnéticos.

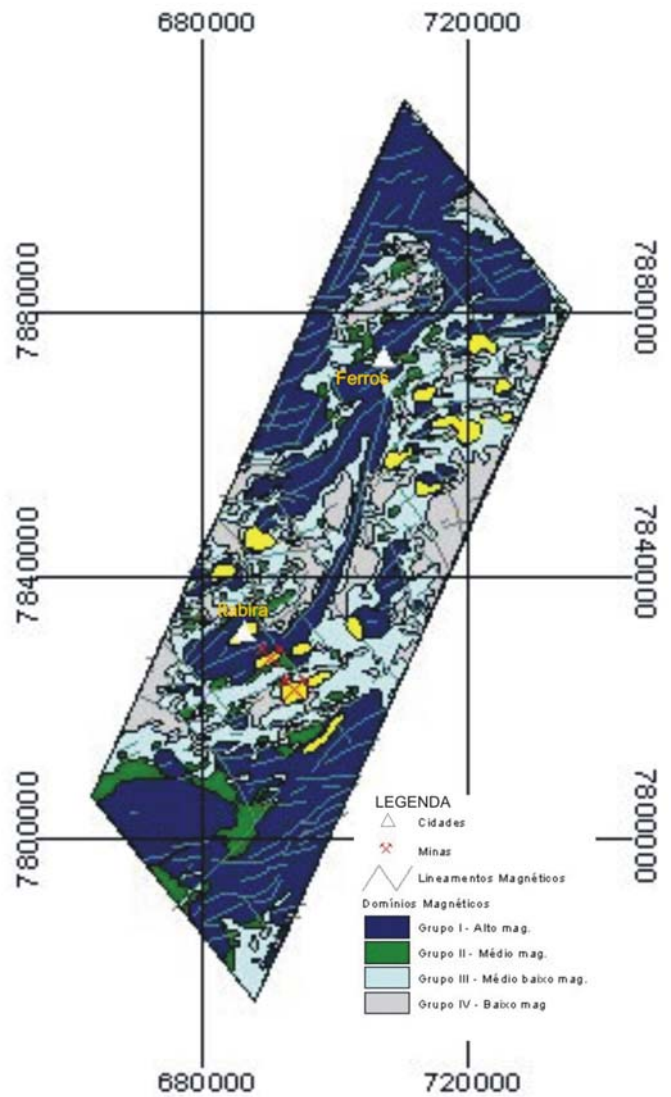


Figura 7 - - Mapa de lineamentos e domínios magnéticos integrados, ilustrando ocorrências minerais conhecidas e áreas potenciais para mineralização de esmeralda.