APLICAÇÃO DA GEOFÍSICA AÉREA NA EXPLORAÇÃO MINERAL E MAPEAMENTO GEOLÓGICO DO SETOR SUDOESTE DO CINTURÃO CUPRÍFERO ORÓS-JAGUARIBE

MARCUS VINÍCIUS RODRIGUES MAAS¹, CLAUDINEI GOUVEIA DE OLIVEIRA²,
AUGUSTO CÉSAR BITTENCOURT PIRES³
& ROBERTO ALEXANDRE VITÓRIA DE MORAES⁴

Abstract AIRBORNE GEOPHYSICS APPLIED TO MINERAL EXPLORATION AND GEOLOGICAL MAPPING IN THE SOUTHWEST SECTOR OF THE ORÓS-JAGUARIBE COPPER BELT, NORTHEASTERN BRAZIL Mineral deposits like those of the Cu-Au-U-ETR-Fe-oxides class are commonly associated with hydrothermal alteration zones that are detectable by airborne geophysical methods. In The Pio IX, São Julião and Fronteiras region (Piauí State), and Campos Sales region (Ceará State) there are copper occurrences in Eo-cambrian molassic basins, and others associated with fault breccias in hydrothermal alteration zones due to Post-Brasiliano granites (550 My) intruded in Mesoproterozoic orthogneisses and metavolcanic rocks of the Orós Group. This region is covered by the airborne geophysical survey called "Projeto Borda Leste da Bacia do Maranhão" (Magnetometry and Gamma-spectrometry with flight line spacing of 1 km). The processing and interpretation of these data are presented here, with an aim to help geological mapping and mineral exploration. The magnetic images of anomalous field, first vertical derivative, analytical signal amplitude and phase, and 3D Euler deconvolution maps were used to delineate the structural framework and the magnetic domains. The RGB ternary image (K:Th:U) was used to delineate the gamma-spectrometric domains. The integration of the magnetic and gamma-spectrometric interpretation yielded a geological-geophysical map. The anomalous potassium and uranium images were used to identify probable zones of potassic hydrothermal alteration that suggest targets for future follow-up.

Keywords: Airborne Geophysics, mineral exploration, copper occurrences, anomalous potassium, hydrothermal alteration, SW of Orós-Jaguaribe copper-belt.

Resumo Depósitos minerais como os da classe Cu-Au-U-ETR-óxidos de Fe são normalmente associados a zonas de alteração hidrotermal que são detectáveis por métodos geofísicos aéreos. Na região de Pio IX, São Julião e Fronteiras (Piauí) e Campos Sales (Ceará) existem ocorrências de cobre em bacias molássicas Eo-cambrianas, e outras associadas a zonas de alteração hidrotermal em granitos pós-brasilianos (550 Ma), e em brechas de falha nas rochas metavulcânicas e ortogneisses mesoproterozóicos do Grupo Orós intrudidos por estes granitos. Esta região é totalmente coberta pelo levantamento aerogeofísico Projeto Borda Leste da Bacia do Maranhão (magnetometria e gamaespectrometria com espaçamento das linhas de voo de 1 km). O presente artigo trata do processamento e interpretação destes dados na área para auxiliar no mapeamento geológico e exploração mineral. As imagens magnetométricas de campo anômalo, primeira derivada vertical, amplitude e fase do sinal analítico e os mapas de deconvolução Euler-3D foram usados para delinear o arcabouço estrutural e os domínios magnéticos. A imagem gamaespectrométrica ternária RGB (K:Th:U) foi usada para delimitar os domínios gamaespectrométricos. A integração das interpretações magnética e gamaespectrométrica resultou em um mapa de unidades geológico-geofísicas integradas. As imagens de potássio e urânio anômalos permitiram identificar prováveis zonas de alteração hidrotermal potássica que foram sugeridas como alvos para detalhamento.

Palavras-chave: Geofísica aérea, exploração mineral, ocorrências de cobre, potássio anômalo, alteração hidrotermal, SW do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe.

INTRODUÇÃO No nordeste do Brasil, numa região que engloba diversos municípios da fronteira entre os estados do Piauí (Mandacaru, São Julião, Fronteiras, Pio IX) e Ceará (Campos Sales), domina um quadro geológico pertencente ao sudoeste da Província Borborema que tem sido, por mais de duas décadas, alvo de prospecção e avaliação de ocorrências de cobre por diversas companhias de mineração.

No início da década de 1980, a Companhia de Desenvolvimento do Estado do Piauí-CONDEPI descobriu um depósito sub-

econômico de cobre, nas proximidades da cidade de São Julião-PI, que se encontra hospedado em um pacote de rochas vulcano-sedimentares (Formação Jaibaras, Grupo Rio Jucá), representadas por rochas sedimentares detríticas continentais e vulcânicas/piroclásticas ácidas eo-cambrianas, e em intrusões graníticas contemporâneas (do tipo granito Mandacaru) (Lopes Filho *et al* 1982).

Em meados da década de 90, a companhia Western Mining Corporation-WMC delimitou na região entre os municípios de Fronteiras e Pio IX importantes ocorrências de brechas quartzo-

1 - Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (UnB), marcus@unb.br

2 - Departamento de Geoquímica e Recursos Minerais (GRM-IG-UnB), gouveia@unb.br

3 - Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (UnB), acbpires@unb.br

4 - Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília (UnB), rmoraes@unb.br

hematíticas, portadoras de cobre, hospedadas em granitos pós-brasileiros, em ortognaisses e rochas metavulcânicas ácidas do Grupo Orós (Naves de Carvalho, *comum. pess.* 2001). No entanto, o projeto foi abandonado sem que tivesse sido elaborado um estudo de avaliação conclusivo sobre a potencialidade das ocorrências cupríferas.

Segundo Oliveira & Maas (2002), as brechas quartzo-hematíticas da região de Fronteiras-Pio IX fazem parte de um contexto regional que se estende por centenas de quilômetros (cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe), ao qual se associam outras importantes ocorrências de Cu-hematita. A gênese dessa mineralização, que em parte se adapta ao modelo mais amplo dos depósitos da classe óxidos de Fe-Cu-Au (Hitzman, 2000), pode estar vinculada ao colapso orogênico que se sucedeu às colisões brasileiras. Este mecanismo teria dirigido a ascensão de fluidos tardios exsolvidos de fontes magmáticas e o influxo descendente de fluidos meteóricos oxidados lixiviados da pilha sedimentar (*red beds*). A mistura dessas soluções, e a conseqüente precipitação do Cu, ocorreu em um nível crustal raso (epizona) marcado por metassomatismo de ferro, sílica (*stockworks*) e urânio, além de alteração hidrotermal hidrolítica dos tipos propilitização (epidoto e clorita com carbonato associado) e sericitização.

O modo de ocorrência das brechas quartzo-hematíticas sob a forma de corpos com geometria tabular sub-vertical alojados em corpos graníticos e a presença de halos de alteração hidrotermal com minerais portadores de potássio e urânio, que acompanham o processo de mineralização de cobre, fazem deste quadro geológico uma situação ideal onde a aplicação de métodos geofísicos aéreos (gamaespectrometria e magnetometria) fornecem informações relevantes que permitem a delimitação precisa dos domínios hidrotermalizados. Dentro desse contexto, este trabalho tem como propósito principal utilizar-se de dados disponíveis de um levantamento aerogeofísico regional (Projeto Borda Leste da Bacia do Maranhão com Magnetometria e Gamaespectrometria) no auxílio do mapeamento geológico e do estudo dos controles da mineralização cuprífera no extremo sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe.

GEOLOGIA REGIONAL A área estudada se insere na borda leste da Bacia do Parnaíba (Fig. 1), dentro do contexto do terreno Orós-Jaguaribe (Gomes 2000). Esta unidade tectono-estratigráfica, que se mostra delimitada por corredores deformacionais dúcteis brasileiros que integram o domínio ocidental do sistema de cisalhamento Borborema (Fig. 2; Vauchez *et al.* 1995), compõe-se de um embasamento (Complexo São Nicolau) diagnosticado em maior proporção por paragneisses e ortognaisses tonalíticos gerados em arcos magmáticos transamazônicos (1985 Ma). Estes autores propõem que sobre esse embasamento assenta-se uma seqüência vulcano-sedimentar (Grupo Orós) formada em uma bacia tipo rifte intracontinental durante o Mesoproterozóico (1.673 Ma; Sá 1991).

Todo esse conjunto está deformado por zonas de cisalhamento dúctil a rúptil, dispostas segundo o *trend* regional NE-SW (Zona de Cisalhamento Tatajuba), e recortado por gerações de granitóides brasileiros sin a pós-tectônicos (650 a 550 Ma) (Fig. 2). O estágio final da evolução brasileira foi dominado por tectônica transtensiva pós-orogênica, à qual se associa espessa sedimentação molássica (Bacia Cococi, Grupo Rio Jucá; Moraes *et al.* 1962) e magmatismo granítico alcalino, representado na região pelo granito Mandacaru com idade Rb-Sr de 550 Ma (Parente 1984) e seus correspondentes vulcânicos nas fossas molássicas. Durante esta fase

Figura 1 - Mapa de localização da área estudada

transtensiva, as falhas transcorrentes dúcteis foram reativadas como falhas normais e se desenvolveram outras estruturas rúpteis de colapso pós-orogênico.

A ocorrência das brechas é controlada por zonas discretas de cisalhamento rúptil, com disposição em alto ângulo, que teriam se adaptado, em parte, ao traço das superfícies axiais das dobras regionais brasileiras e/ou ao arranjo das falhas que controlam as bacias molássicas. As zonas de brechas exibem larguras variáveis e mostram, em muitos casos, íntima associação espacial com corpos granitóides róseos de granulação grossa, provavelmente pós-brasileiros.

O conjunto das brechas descritas se distribui entre os extremos de brechas quartzo-hematíticas e brechas epidóticas. As variações compõem-se de fragmentos angulosos, com dimensões que atingem até dezenas de centímetros, imersos em matriz neoformada composta em proporções variáveis por hematita fina, epidoto, clorita, carbonato e sericita. Os fragmentos são representados por granitóides deformados, clastos quartzo-feldspáticos xenomórficos e agregados de hematita (Oliveira & Maas 2002).

NATUREZA DOS DADOS ESTUDADOS O aerolevanteamento Projeto Borda Leste da Bacia do Maranhão (PBLBM) resultou de um convênio entre o DNPM e a CPRM em 1979 objetivando a coleta de dados do campo magnético e da emissividade natural das radiações gama na área assinalada (Fig. 1). A aquisição e o processamento preliminar dos dados (Tabela 1) foram efetuados pela ENCAL S/A.

A aeronave utilizada foi um bimotor Islander prefixo PT-KRO que voou a aproximadamente 200 km/h e adotou navegação visual por fotografias aéreas e radar de efeito Doppler. A altura em relação ao solo foi controlada por radar altímetro. Filmes de rastreamento foram utilizados para recuperação dos trajetos voados. Os instrumentos geofísicos utilizados foram um magnetômetro de precessão protônica livre GEOMETRICS G-803 e um gamaespectrômetro EXPLORANIUM DIGRS-3001 com cristais detectores de iodeto de sódio ativado por Tálcio com volume total de 1024 polegadas cúbicas. Os dados magnéticos foram registrados em nanotesla (nT) e os gamaespectrométricos (discriminados em quatro bandas energéticas) foram registrados em contagem por segundo (cps). O espectro de energia foi amostrado nas seguintes janelas: conta-

Figura 2 - Localização da área na macro-estrutura do Sistema de Cisalhamento Borborema(modificado de Vauchez et al. 1995).

Tabela 1 - Características do Projeto Borda Leste da Bacia do Maranhão

CONTRATANTE	DNPM/CPRM
CONTRATADO	ENCAL S. A.
NÚMERO DE BLOCOS	02
ÁREA LEVANTADA	29000 km ²
TOTAL DE PERFIS	30400 km
DIREÇÃO/ESPAÇAMENTO DAS LINHAS DE VÔO	N30W/ 1 km
DIREÇÃO/ESPAÇAMENTO DAS LINHAS DE CONTROLE	N60E/ 20 km
ALTURA DE VÔO	150 m
INTERVALO DE AMOSTRAGEM	100 m
PERÍODO DO LEVANTAMENTO	Julho a Outubro de 1979

gem total (0,4-2,81 MeV), Potássio (1,37-1,57 MeV), Urânio (1,66-1,86 MeV) e Tório (2,41-2,81 MeV) (CPRM & DNPM 1982).

Os arquivos digitais finais foram recentemente formatados pela CPRM em arquivo ASCII (*.xyz) que contém as coordenadas em UTM, o valor do campo magnético reduzido do IGRF (ano de 1979.7), valores corrigidos dos canais de contagem total, urânio, tório e potássio e valores das alturas barométrica e elétrica em metros. Estes dados foram disponibilizados pela CPRM em CD-ROM, juntamente com um texto explicativo.

PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS O processamento foi efetuado em meio digital com o uso do programa OASIS MontajTM da GEOSOFT, (GEOSOFT 1996,1998). A figura 3 resume as etapas do processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos.

Inicialmente foram efetuados testes de consistência para se eliminar defeitos de posicionamento nos dados relativos à posição

Figura 3 - Etapas do processamento e interpretação dos dados do PBLM para a área estudada

nas linhas de vô, picos (*spikes*) nos dados referentes a ruído durante a aquisição e/ou arquivamento dos dados. Após esta etapa inicial, os canais do campo magnético anômalo, potássio, tório, urânio e contagem total foram interpolados em malhas regulares com células de 250 m, utilizando o interpolador *bi-grid* indicado para dados coletados em linhas (Blum 1999). Posteriormente, os dados foram micronivelados para se eliminar ruídos decorrentes do desnivelamento entre as linhas de vô. Para tal utilizou-se a sub-rotina *microlevel.gs* desenvolvida por Blum (1999), a partir do algoritmo de Minty (1991).

As figuras 4A e 5A mostram, respectivamente, a imagem do campo magnético anômalo e composição ternária RGB dos canais de K, Th e U micronivelados.

INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS A interpretação dos dados teve dois objetivos: i) elaborar um mapa de unidades geológico-geofísicas integradas (Fig. 6) e, ii) um mapa de alvos sugeridos para detalhamento em futuras campanhas de prospecção de cobre na região (Fig. 5F). Os produtos utilizados para interpretação foram: i) imagem do campo magnético anômalo juntamente com sua deconvolução Euler 3D e transformações lineares no domínio de Fourier, ii) imagem ternária RGB (K:Th:U), e iii) imagens de potássio e urânio anômalos.

A interpretação foi efetuada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) com as imagens sendo exportadas no formato *geotif* para o programa *Arc View 3.2* (ESRI), onde os ma-

pas interpretados foram produzidos.

Imagens magnetométricas CAMPO MAGNÉTICO ANÔMALO (FIG. 4A) A área possui relevo magnético bastante movimentado, onde as anomalias alongadas segundo N50E (lineares) correspondem espacialmente às posições assinaladas para as falhas transcorrentes subverticais pertencentes ao subsistema Tatajuba. Outras anomalias longilíneas foram interpretadas como estruturas de colapso pós-brasiliano que parecem controlar a distribuição espacial das brechas portadoras de cobre. Outra feição marcante é a grande anomalia dipolar com forte componente negativa situada a norte da cidade de Campos Sales, que corresponde a uma grande camada de metabasalto pertencente ao Grupo Orós. Para a caracterização dos domínios magnéticos utilizou-se o método aplicado por Parro (1998) onde cada unidade magnética foi individualizada pelo seu padrão de relevo magnético traduzido no comprimento de onda das anomalias.

PRIMEIRA DERIVADA VERTICAL (Fig. 4B) Esta é uma técnica de realce das altas frequências do sinal magnético onde a anomalia magnética (T) é transformada linearmente por meio da derivada primeira da componente vertical z do campo magnético anômalo. Na verdade a derivada vertical mede a taxa de variação do campo magnético anômalo à medida que se distancia ou se aproxima verticalmente da fonte causativa (Blakely 1996). É dada, no domínio de Fourier, por:

$$\mathcal{F}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = |k| \mathcal{F}[T] \text{ onde } k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \text{ equação (1)}$$

onde k_x e k_y são os números de onda nas direções x e y, respectivamente.

A imagem da primeira derivada vertical (Fig. 4B) permite visualizar mais nitidamente os contrastes entre os diferentes domínios magnéticos identificados a partir da imagem do campo magnético anômalo. As falhas transcorrentes dúcteis do subsistema Tatajuba, juntamente com as estruturas rúpteis que controlam a distribuição das brechas, estão mais bem delineadas.

AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO (Fig. 4C) Como a região estudada se situa muito próxima ao equador magnético, as anomalias magnéticas são formadas por assinaturas complexas, às vezes de difícil relacionamento com a posição da fonte causadora.

Para contornar este fato, utilizou-se a amplitude do sinal analítico do campo magnético (obtido atribuindo a $n=0$ na equação abaixo). É uma função simétrica, cujos picos estão centrados nas bordas do corpo anômalo ou na feição geológica correspondente, mapeando-os (Nabighian 1972, 1984, Roest *et al.* 1992, Hsu *et al.* 1996). É dada por:

$$|\vec{A}_n(x, y)| = \sqrt{\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^n T}{\partial z^n}\right)\right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^n T}{\partial z^n}\right)\right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial^n T}{\partial z^n}\right)\right]^2}, n=0, 1, 2, \dots \text{ (equação 2)}$$

Tem vantagens sobre a redução ao pólo, quando aplicada com o mesmo objetivo (locação das fontes magnéticas) principalmente nas baixas latitudes magnéticas, onde o operador de transformação de fase é sabidamente instável (McLeod *et al.* 1993; Blakely, 1996). Além disso, para que a transformação ao pólo tenha bom significado geológico, deve incorporar a magnetização remanescente, que está sempre presente nos materiais geológicos. Como se sabe, o mapeamento real desta propriedade física é tarefa bastante difícil, senão impossível de ser realizada, o que torna a transformação de fase incompleta. As indicações de posicionamento

Figura 4 - Imagens magnetométricas de relevo sombreado com iluminação a N45W. A) Campo magnético anômalo B) Primeira derivada vertical C) Amplitude do sinal analítico D) Fase do sinal analítico. Plots de soluções da Deconvolução Euler: E) índice estrutural de 0,5, F) índice estrutural de 1 G) arcabouço estrutural interpretado.

Figura 5 - A) Imagem ternária RGB (K:Th:U) da área estudada; B) Imagem de potássio anômalo para a área de ocorrência das rochas supracrustais do grupo Orós; C) Imagem de urânio anômalo para a mesma área; D) Gráfico de dispersão potássio-tório; E) Gráfico de dispersão urânio-tório; F) Alvos sugeridos para detalhamento: possíveis zonas de alteração hidrotermal com brechação associada

Tércio-Quaternário

□ CTQ-Sedimentos detríticos ricos em urânio e tório, não magnéticos

Siluriano- Bacia do Parnaíba

■ FmSg- Rochas sedimentares silurianas pobres em potássio, urânio e tório, não magnéticos pertencentes à Fm. Serra Grande

Eo-Cambriano

■ Jb- Fossas molássicas (Grupo Jaibaras) com rochas sedimentares ricas em potássio e tório, fracamente magnéticas

■ SG6a-Granitos pós-colisionais (colapso) ricos em urânio, moderada a fortemente magnéticos

■ SG6b- Granitos pós-colisionais (colapso) interpretados a partir da amplitude do sinal analítico

Neoproterozóico- Suítes Graníticas (SG)

□ Mig- Septos de migmatização ricos em potássio, urânio e tório, moderada a fortemente magnéticos

■ SG5- Granitos pré a sin-colisionais ricos em urânio, fracamente magnéticos.

■ SG4- Granitos pré a sin-colisionais ricos em potássio e urânio, moderada a fracamente magnéticos.

■ SG3-Granitos pré a sin-colisionais ricos em potássio, tório e urânio, moderada a fortemente magnéticos

■ SG2- Granitos pré a sin-colisionais ricos em potássio, moderadamente magnéticos

■ SG1- Granitos sin-colisionais milonitizados, ricos em potássio, tório e urânio, moderada a fortemente magnéticos

Mesoproterozóico- Grupo Orós (GrO)

■ GrO5- Metassedimentares químicas e detríticas subordinadas, pobres em potássio, urânio e tório, moderada a fortemente magnéticas

■ GrO4- Metabasaltos amigdaloidais anfibolitizados, pobres em potássio, urânio e tório, fortemente magnéticos

■ GrO3- Metavulcânicas ácidas ricas em potássio, localmente gnaissificadas e fracamente magnéticas

■ GrO2- Metavulcânicas ácidas ricas em potássio e tório, localmente gnaissificadas, moderada a fortemente magnéticas

■ GrO1- Metavulcânicas ácidas, ricas em tório, localmente gnaissificadas, moderadamente magnéticas

Paleo-Mesoproterozóico- Complexo São Nicolau (CSN)

■ CSN4- Ortognaisses ricos em potássio e urânio, moderadamente magnéticos

■ CSN3- Ortognaisses ricos em urânio, fraca a moderadamente magnéticos

■ CSN2- Ortognaisses ricos em tório, fraca a moderadamente magnéticos

■ CSN1- Ortognaisses ricos em potássio e tório, fracamente magnéticos

Figura 6 - Mapa de unidades geofísicas e geológicas integradas

de fontes a partir da amplitude do sinal analítico, por sua vez, independem do conhecimento prévio da remanência e é tanto mais efetivo quanto mais a geometria da fonte se aproximar da 2-D (corpos diquiformes).

Analisando a imagem da amplitude do sinal analítico (Fig. 4C) verifica-se que as falhas transcorrentes são representadas pelo alinhamento de altos valores de amplitude, permitindo delinear com precisão o arcabouço estrutural do subsistema Tatajuba na área (Fig. 4G). A cinemática das falhas foi indicada por meio de desfiamentos (*splays*) e das estruturas de arrasto, como a grande dobra com concavidade voltada para Oeste entre Fronteiras e Pio IX e estruturas menores a norte da camada de basalto (Fig. 4G). Essa última mostra-se com altos valores de amplitude de forma que sua delimitação é bem nítida. Os baixos valores nas porções W e NW são decorrentes das coberturas sedimentares não magnéticas da borda da Bacia do Parnaíba (Fm. Serra Grande). As estruturas interpretadas como de colapso pós-brasiliano também são bem delineadas e, localmente, se associam a corpos circulares, sendo esses interpretados como prováveis intrusões graníticas pós-tectônicas (tipo Granito Mandacaru). Com essa imagem foi possível também distinguir os ortognaisses não magnéticos do Complexo São Nicolau a norte, de granitos brasileiros de magnetização variável a sul da falha principal do subsistema Tatajuba.

FASE DO SINAL ANALÍTICO (FIG. 4D) Marca o comportamento espacial do vetor do sinal analítico (atitude) no plano vertical que contém a resultante de sua componente horizontal no ponto considerado. Tem se mostrado eficiente no mapeamento das feições lineares do relevo magnético (comumente relacionáveis às feições texturais/estruturais dos materiais geológicos subjacentes) e, pelo seu arranjo espacial e textura relativa, na delimitação das diversas unidades magnéticas, feições, por vezes não muito aparentes na amplitude do sinal analítico. É fornecida por:

$$\text{fase} \left[\vec{A}_n(x, y) \right] = \frac{\text{Im} \left[\vec{A}_n(x, y) \right]}{\text{Re} \left[\vec{A}_n(x, y) \right]}, \text{ onde } n=0,1,2... \text{ equação (3)}$$

A imagem da fase do sinal analítico (Fig. 4D) mostra com bastante nitidez as estruturas presentes nas outras imagens e também lineamentos menores dentro das unidades que representam contrastes menores de magnetização. Os domínios magnéticos são melhores individualizados por texturas diferentes, o que mostra que a fase do sinal analítico é uma ferramenta eficiente de auxílio ao mapeamento geológico-estrutural.

DECONVOLUÇÃO EULER 3D (FIGS. 4E E 4F) É uma das técnicas de interpretação quantitativa em três dimensões de um grande conjunto de anomalias (levantamentos aeromagnéticos). Trata-se de um procedimento integrado de localização de fontes magnéticas por meio da relação de homogeneidade de Euler para campos potenciais (Blakely 1996):

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \text{ equação (4)}$$

Onde T é a função campo anômalo e, qualquer solução para esta equação de Laplace é uma função harmônica se suas derivadas primeiras são contínuas e se suas derivadas segundas existem. Por propriedades comutativas dos operadores de derivada, se uma função é harmônica então suas derivadas também o são.

A função campo magnético T é dita homogênea em grau n se satisfaz a Equação de Euler:

$$x \frac{\partial T}{\partial x} + y \frac{\partial T}{\partial y} + z \frac{\partial T}{\partial z} = nT \text{ equação (5)}$$

O grau de homogeneidade (ou índice de atenuação) n varia com o grau de complexidade (geometria) da fonte magnética de modo que de forma generalizada temos, segundo Reid *et al.* (1990): **índice 0**- modelo de contato geológico simples (gradientes fracos); **índice 1**- fonte 1D, linha de monopolos, modelo de dique ou falha; **índice 2**- fonte 2D, linha de dipolos, modelo de dique ou falha; **índice 3**- fonte 3D, esfera magnetizada.

Como os materiais geológicos nem sempre possuem geometrias regulares, índices intermediários podem ser utilizados. No caso foram usados os índices 0, 0.5, 1, 2, 2.5 e 3, sendo que os índices 0.5 e 1 apresentaram melhores resultados.

Considerando T_i uma anomalia magnética medida no i-ésimo ponto (x,y,z) de um levantamento aeromagnético e (x_0, y_0, z_0) as coordenadas do topo da fonte causativa, a equação (5) pode ser reescrita como:

$$\left[\frac{\partial T_i}{\partial x} \quad \frac{\partial T_i}{\partial y} \quad \frac{\partial T_i}{\partial z} \right] \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} = n T_i \text{ equação (6)}$$

Estendendo-se este operador para um determinado número de anomalias em uma malha interpolada (janela) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial x} & \frac{\partial T_1}{\partial y} & \frac{\partial T_1}{\partial z} \\ \frac{\partial T_2}{\partial x} & \frac{\partial T_2}{\partial y} & \frac{\partial T_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ equação (7)}$$

de forma que as incógnitas sempre serão x_0, y_0, z_0 e n em um sistema superdeterminado. Este sistema pode ser resolvido para a localização da fonte (x_0, y_0, z_0) fixando o índice estrutural n, se o intérprete já tem uma idéia do tipo de fonte magnética. Se a localização da fonte já for conhecida, o sistema pode ser resolvido para o índice estrutural n, para se ter alguma informação a respeito da geometria da fonte. A janela do operador utilizada foi de 5 km (20x20 na malha), e este foi deslocado em toda a malha de modo que todas as soluções para cada índice estrutural sejam reunidas e plotadas em um único mapa.

Em aerolevantamentos as anomalias presentes são causadas por fontes de diferentes geometrias, ou seja, de diferentes índices estruturais. Para contornar esse fato, Reid *et al.* (1990) propõem que sejam geradas soluções para cada índice empregado, de forma que cada fonte será melhor resolvida por um melhor alinhamento de soluções fornecidas por determinado índice.

Na área estudada as fontes magnéticas mais significativas são as falhas transcorrentes dúcteis do subsistema Tatajuba, as estruturas interpretadas como de colapso pós-brasilianas e contatos subverticais entre diferentes unidades litológicas. As melhores soluções foram fornecidas pelos índices estruturais 0.5 e 1, mostradas nas figs. 4E e 4F. O tamanho da janela (5x5 km) permitiu o mapeamento de fontes superficiais até as localizadas a cerca de 1,5 km. Para o mapeamento de fontes mais profundas janelas maiores devem ser utilizadas. Um fato interessante é que na parte central da zona de cisalhamento Tatajuba, logo a norte de Fronteiras, o alinhamento das soluções mostra em profundidade que esta é uma falha transcorrente dextral com mergulho entre 50° e 70° para sul, o que é verdadeiro de acordo com a estruturação local

identificada em levantamentos geológicos anteriores (Gomes 2000).

Comparando os mapas de deconvolução Euler-3D com as imagens de relevo sombreado, fica demonstrada a eficácia deste procedimento para o mapeamento de fontes magnéticas. O mapa do arcabouço estrutural interpretado (Fig. 4G) foi confeccionado a partir da análise conjunta de todos os produtos magnéticos.

Imagens Gamaespectrométricas As imagens utilizadas para a interpretação foram: composição ternária RGB (K:Th:U), potássio e urânio anômalos.

IMAGE TERNÁRIA RGB (FIG. 5A) É uma composição em falsa cor dos canais de potássio, tório e urânio micronivelados. A cada radioelemento é atribuída uma cor de forma que temos: **vermelho**: rochas ricas em potássio; **verde**: rochas ricas em tório; **azul**: rochas ricas em urânio; **amarelo**: rochas ricas em potássio e tório; **ciano**: rochas ricas em tório e urânio; **magenta**: rochas ricas em potássio e urânio; **branco**: rochas ricas em potássio, urânio e tório; **preto**: ausência dos três radioelementos.

Com esta imagem foi possível individualizar vários domínios gamaespectrométricos de forma que cada unidade foi caracterizada de acordo com seu conteúdo de radioelementos. Os domínios estão mostrados na fig 6. O Complexo São Nicolau (CSN) foi subdividido nas subunidades CSN1, CSN2, CSN3 e CSN4; o Grupo Orós (GrO) foi subdividido nas subunidades GrO1, GrO2, GrO3, GrO4 e GrO5; as suítes graníticas (SG) Neoproterozóicas foram subdivididas em SG1 (sin-tectônicas), SG2, SG3, SG4 e SG5 como sendo granitos pré a sin-tectônicos; os granitos pós-tectônicos tipo Mandacaru são ricos em K e U e correspondem à unidade SG6a; os sedimentos molássicos do Grupo Jaibaras (Jb) são, na região de São Julião, ricos em K e Th, mas sua assinatura não é uniforme em toda a área. Os arenitos silurianos da Formação Serra Grande são pobres em K, U e Th, indicativo da ausência de argilo minerais. As coberturas Tercio-quaternárias (CTQ) são sedimentos ricos em Th e U, depositados em bacias restritas durante reativações tardias das estruturas do subsistema Tatajuba.

POTÁSSIO E URÂNIO ANÔMALOS (FIGURAS 5B E 5C) Esta é uma técnica desenvolvida por Pires (1995) para identificar zonas de alteração hidrotermal por meio de concentrações anômalas de K e U. O método parte do princípio que este dois radioelementos são mais geoquimicamente móveis que o Th. Se em determinada área a correlação do K e U com o Th for de 1:1, basta subtrair 1 das razões K/Th e U/Th que o restante será a parte remobilizada por processos hidrotermais, ou seja, K e U anômalos. As premissas básicas para a aplicação desta técnica são: i) a área de investigação deve ser composta por unidades geológicas cogenéticas, onde a correlação entre K-Th e U-Th seja mais próxima de 1:1. ii) deve existir um conhecimento geológico a priori (escala 1:250000 e maiores) para se evitar erros na escolha da área a ser aplicada a técnica. iii) zonas de cisalhamento dúcteis de alta temperatura devem ser evitadas, pois costumam ter septos de migmatização associados e que são também acumulações anômalas de K e U sem interesse econômico.

Segundo Oliveira & Maas (2002) as brechas quartzo-hematíticas são parte de um contexto regional que se estende por centenas de quilômetros, ao qual se associam importantes ocorrências de Cu-hematita. A gênese dessa mineralização pode estar ligada ao colapso orogênico que sucedeu as colisões brasileiras. Este processo teria dirigido a ascensão de fluidos tardios exolvidos de fontes magmáticas e o influxo descendente de fluidos meteoríticos oxidados lixiados da pilha sedimentar (*red beds*). A mistura dessas soluções, e a conseqüente precipitação do Cu, ocorreu em nível crustal raso (epizona) marcado por metassomatismo de Fe e sílica (*stockworks*) e alteração hidrotermal por propilitização (epidoto-clorita±carbonato) e sericitização. Tendo em vista o acima citado a área escolhida foi a de ocorrência da sequência vulcano-sedimentar do Grupo Orós, na qual intrudem os corpos graníticos. Os gráficos de correlação potássio-tório (Fig. 5D) e urânio-tório (Fig. 5E) mostram que a técnica é passível de ser aplicada na área.

As imagens das figuras 5B e 5C mostram que as brechas hematíticas se associam a zonas ricas em K e U controladas por fraturas de colapso pós-brasiliano e a corpos graníticos associados. Isso levou os presentes autores a proporem os alvos da figura Fig.5F para detalhamento de campo.

INTEGRAÇÃO E CONCLUSÃO Fica mais uma vez comprovada a importância da geofísica aérea em campanhas de exploração mineral. A integração dos produtos oriundos das interpretações magnética e gamaespectrométrica gerou o mapa de unidades geológico-geofísicas da figura 6 e o mapa de alvos propostos para detalhamento da figura 5F.

O mapa de unidades integradas mostra que a geologia da área é mais complexa que a proposta por Gomes (2000), onde as rochas do Complexo São Nicolau, do Grupo Orós e das suítes graníticas foram subdivididas em subunidades de acordo com suas assinaturas magnéticas e gamaespectrométricas. A tectônica rúptil pós-brasiliana configurou na área um complexo mosaico de blocos falhados cujos limites foram possíveis de uma delineação geofísica.

A técnica do K e U anômalos (Pires 1995) mostrou ser outra poderosa ferramenta para exploração mineral. De acordo com o modelo metalogenético proposto por Oliveira & Maas (2002), a maioria alvos selecionados na figura 5F coincide com as ocorrências estudadas por estes autores. Isto os torna locais potencialmente importantes na concentração de cobre em brechas hematíticas, uma vez que se tratam de zonas de alteração potássica, ricas em U, controladas por estruturas de colapso com intrusões graníticas alcalinas pós-tectônicas espacialmente associadas.

Agradecimentos À CPRM pela cessão dos dados aerogeofísicos do PBLM e ao Exército Brasileiro pelas imagens de satélite. O primeiro autor agradece à equipe do Laboratório de Geofísica Aplicada pelo apoio durante o processamento e interpretação dos dados e em especial ao Geólogo Marco Túlio Naves de Carvalho pelas informações sobre a área estudada. Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito. O segundo autor é particularmente grato ao sertanejo, que adivinhou as suas vontades e mostrou ainda que existe solidariedade em uma parte do povo brasileiro.

Referências

- Blakely J. B. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press New York, 441 p.
- 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, 229p.
- CPRM, DNPM, Convênio DNPM/CPRM. 1982. *Projeto Borda Leste da Bacia do Maranhão (Levantamento aeromagnetométrico e aerogamaespectrométrico)*, Relatório Final, Volumes I e II, Rio de Janeiro.
- GEOSOFT 1996. *MAGMAP 2-D frequency domain processing*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- GEOSOFT 1998. *OASIS Montaj 4.2*. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- Gomes J.R.C. 2000. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-CPRM. Folha SB-24-Y (Jaguaribe-SW)*, Esc. 1:500000.
- Haynes D.W. 2000. Iron oxide copper (~gold) deposits: their position in the ore deposit spectrum and modes of origin. In: T.M. Porter (Ed.) *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: a global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp 71-90.
- Hitzman M.W. 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, and why. In: Porter T.M. (Ed.) *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: a global perspective*, Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp 9-25.
- Hsu S.K., Sibuet J.C., Shyu C.T. 1996. High-resolution detection of geological boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytical signal technique. *Geophysics*, **61**:373-386.
- Lopes Filho J.B., Lages P.R.R., Silva R.O.C., Neto M.C., Urbano Filho, C. 1982. *Projeto Cobre-Mandacaru*. Relatório final. CONDEPI/PI.
- Macleod, I.N., Vieira, S., e Chaves, A.N., 1993. Analytic signal and reduction-to-the-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. In: SBGF, Congr. Int. Soc. Bras. Geof., 3, *Anais*, **2**, 830-835.
- Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Explor. Geoph.* **22**:591-592.
- Moraes, J.F.S. de et al. 1962. *Reconhecimento fotogeológico da região Nordeste do Brasil, Folha Iguatu - SB.24-O*, escala 1:250.000. DNPM/CPRM. Rio de Janeiro.
- Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, **37**:507-517.
- Nabighian, M.N., 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, **39**:85-92.
- Nabighian M.N., 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relation. *Geophysics*, **49**:957-966.
- Oliveira C.G. de & Maas M.V.R. 2002. Modelo descritivo das brechas quartzo-hematíticas da porção sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 40, João Pessoa, *Boletim de Resumos*.
- Parente C.V. 1984. *Geologia da mineralização de cobre de Mandacaru-PI*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 203p.
- Parro P.S. 1998. *Magnetometria e gamaespectrometria aerotransportadas na interpretação geológico-estrutural da região dos rios Juruena e Teles Pires-MT*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 60p.
- Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Rev. Bras. Geoc.*, **25**:61-68.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. & Somerton, I.W. 1990. Magnetic Interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, **55**:80-91.
- Reynolds, L.J. 2000. Geology of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag-REE deposit. In: Porter T.M. (Ed.) *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: a global perspective*, Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp 93-104.
- Roest W.R., Verhoef J., Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytical signal. *Geophysics*, **57**:116-125.
- Sá J.M. 1991. *Evolucion geodynamique de la ceinture porterozoique d'Orós, Nord-Est du Brésil*. Thèse de doctorat de L'Université de Nancy I, 117p.
- Vaucher A., Neves S.P., Caby R., Corsini M., Egydio-Silva M., Arthaud M., Amaro V. 1995. The Borborema shear zone system. *J. South Am. Earth Sci.*, **8**:247-266.

Manuscrito A-1357

Recebido em 01 de julho de 2002

Revisão dos autores em 12 de setembro de 2003

Revisão aceita em 18 de setembro de 2003