



Pesos de Evidência e sua Aplicação para Exploração Mineral em *Greenstone Belts* Arqueanos: O Exemplo do Supergrupo Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero

Alexandre Amorim Texeira¹³, Adalene Moreira Silva², Augusto César Bittencourt Pires³ e Roberto Alexandre Vitória de Moraes³, Carlos Roberto de Souza Filho. (¹Geostratégia Soluções Tecnológicas, ²DGRN/UNICAMP; ³IG/UnB)

Copyright 2004, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do I SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

The weights of evidence modeling approach was used to locate zones that are favorable for gold mineralization in Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero (QF). The quantitative relationships between geological, geophysical and remote sensing data sets representative of deposit recognition criteria and known gold occurrences are determined using weights of evidence analysis. The geological framework provided the foundation to construct a predictive model that highlight prospective regions in the study area with high exploration potential for greenstone-hosted gold deposits, and specifically delineates potential subregions.

This approach has shown great capability for linking geological, geophysical and remote sensing interpretation, as well as hybrid products. The results of these modeling map areas of exposed and subsurface geologic units that are important to gold exploration in the area.

Introdução

A ferramenta pesos de evidência (Bonham-Carter 1994, Bonham-Carter *et al.* 1988) é um modelo guiado pelos dados, inicialmente utilizado na área de medicina e que vem sendo aplicado na exploração mineral. Tal método é fundamentado na relação estatística entre os vários planos de informação e suas características sobre as ocorrências minerais.

Este trabalho apresenta a aplicação da técnica pesos de evidência na região do *Greenstone Belt* Rio das Velhas, utilizando produtos derivados do processamento de dados aerogeofísicos, de sensoriamento remoto ou produtos híbridos da integração e da interpretação destes (Teixeira 2003) (Figura 1). A técnica, em questão, vem sendo consolidada nos últimos quinze anos. Vários modelos de previsão vem sendo apresentados na literatura. No entanto, não se conhece modelos que incorporem o processamento de dados geofísicos refinado, bem como produtos decorrentes da classificação de dados não supervisionada. Objetiva-se, portanto, testar a eficácia destes produtos quando da

utilização da técnica supracitada e apontar novos alvos para seleção mineral.

Processamento dos Dados

O processamento dos dados para o cálculo de Pesos de Evidência foi conduzido por meio da Extensão **Arc-SDM** desenvolvida pelo Serviço Geológico Canadense (Kemp *et al.* 2001) para o software de SIG Arcview 3.x (ESRI). Para tanto, configurou-se o sistema de tal modo que o tamanho das células das malhas tivessem 2500 m². A escolha do tamanho da célula levou em consideração precisão da escala de trabalho e dos dados utilizados, que é de 1:100.000.

Os dados aerogeofísicos utilizados nesse trabalho foram processados por Silva (1999) e, parte deles, reprocessados por Fuck (2001). Os produtos processados consistem dos mapas transformados do campo magnético anômalo: amplitude do sinal analítico de ordem zero, primeira derivada vertical e fase do sinal analítico. Dentre os vários mapas eletromagnetométricos, o único que será utilizado nesse trabalho é o canal de 4.175Hz porque, segundo Silva (1999), este é o melhor canal para mapear condutores múltiplos e pequenos alvos em profundidade e exclui a influência antrópica observada no canal de 33.000Hz. Todos os canais gamaespectrométricos foram aproveitados nesse trabalho (canais de contagem total, potássio, tório e urânio). O mapa de resistividade de Fuck (2001) foi transformado para condutividade (1/resistividade) e foram tomados os logaritmos destes valores no estudo.

Por fim, todos os produtos processados por Fuck (2001) tiveram seus valores (cps, Hz, nT, etc) quantizados para 8 bits (256 tons de cinza) e convertidos para o formato geotiff. O pré-processamento, interpolação, micronivelamento e processamento dos dados de Fuck (2001), bem como o reprocessamento desses dados e o cálculo de estimativa de profundidade por deconvolução de Euler foram efetuados no programa Oasis Montaj 5,06 da Geosoft. Um avanço no processamento de dados aerogeofísicos, foi a aplicação da deconvolução de Euler numa tentativa de se compreender o comportamento das fontes magnéticas relevantes e sua relação com arcabouço estrutural e mineralizações associadas (Figura 2).

A área estudada é coberta pelos sensores TM/LANDSAT-5 e ETM+/Landsat7, trajetória de órbitas WRS 217 e 218, ponto 74 datadas de 27/04/2001 e 11/08/1999, respectivamente, e compostas pelas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 e 8. O azimute e a elevação solar da cena 218/74, que abrange a maioria absoluta da área, é de 44,78° e 42,23°, respectivamente. O pré-processamento

englobou as etapas de correção geométrica, correção atmosférica, montagem dos mosaicos das cenas e recorte da área de interesse.

A imagem do Radarsat utilizado nesse trabalho engloba a órbita 6142 descendente e compreende o produto Scansar Standard (S7) banda C (5,3 cm) com 25 metros de resolução espacial, polarização HH, inclinação de 98°, ângulo de depressão de 62° e foi adquirido em 07 de janeiro de 1997. O azimute de iluminação da fonte é de aproximadamente 112° com ângulo de incidência entre 45° e 49°. As etapas de pré-processamento envolveram a ortoretificação da imagem por meio do modelo digital de elevação e recorte da área de interesse.

Os dados planialtimétricos utilizados foram curvas de nível topográficas, cotas altimétricas e cursos d'água das cartas topográficas 1:50.000 de Belo Horizonte (MI-2535-3), Caete (MI-2535-4), Rio Acima (MI-2573-1), Acuruí (MI-2573-2), Cata Altas (MI-2574-1), Ouro Preto (MI-2573-4) e Mariana (MI-2574-3). A única carta em escala 1:100.000 utilizada foi a de Itabira (MI-2536) porque não existe levantamento em escala 1:50.000 na parte nordeste da área. Esses dados foram digitalizados e interpolados para criar o Modelo Digital de Elevação (DEM) com resolução espacial de 30 metros. O método de interpolação escolhido foi Rede Irregular de Triângulos (TIN).

O mapa geológico utilizado nesse trabalho resulta do projeto Rio das Velhas (Pinto, 1996) em escala 1:100.000 editado pelo consórcio DNPM/CPRM e está no modelo vetorial formato *shapefile* da *Environmental System Research Institute* (ESRI).

Técnicas de Processamento Digital de Imagens tais como o realce por composição colorida falsa-cor RGB, análise por componentes principais, classificação não supervisionada por média-k (Figura 3) e, principalmente, transformação IHS foram aplicadas nos dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto.

A interpretação dos dados foi efetuada nas imagens integradas e resultou na delimitação de 57 unidades litogeofísicas classificadas de acordo com a análise das formas de drenagem, de relevo topográfico, de relevo magnético, das estimativas de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler-3D (Figura 2), bem como da análise da textura da imagem de radar e do relevo magnético. Interpretou-se quatro conjuntos de estruturas: direcionais, lineamentos indiscriminados, lineamentos magnéticos e estruturas relacionadas à zona de cisalhamento São Vicente. Os resultados foram confrontados com o mapa geológico disponível em escala 1:100.000.

A seguir, transformou-se todos os dados utilizados no modelo, bem como os resultantes da classificação não supervisionada por média-k e da análise por componentes principais das imagens aerogeofísicas, do formato GEOTIFF para o formato grid do Arcview 3.2 (ESRI). Todas as operações de cálculo de equidistância de feições espaciais ou de reclassificação de grids foram efetuadas por meio da extensão *Spatial Analyst* do Arcview 3.2 (ESRI). Os dados vetoriais como a

localização das minas, as estimativas de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler, as estruturas e as unidades litogeofísicas foram incorporadas no sistema no formato *shapefile* do software Arcview (Teixeira 2003).

Extração dos Dados de Previsão Significantes

A partir dos produtos resultantes do processamento digital de imagens aerogeofísicas e do mapa litogeofísico pôde-se extrair os dados de previsão significantes utilizados na modelagem por pesos de evidência. Assim, os produtos resultantes do processamento digital de imagens como a classificação não supervisionada por média-k e análise por Componentes Principais das imagens aerogeofísicas, bem como a interpretação de domínios litogeofísicos foram utilizados como os condicionantes e representantes das rochas hospedeiras. Já os produtos resultantes da interpretação estrutural e as estimativa de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler forneceram os condicionantes estruturais dos modelos conceituais mineralógicos. O dados em formato *raster* foram transformados para o formato *grid* do Arcview em 8 bits.

Rochas Hospedeiras

Calculou-se o contraste normalizado das 10 classes resultantes da classificação não supervisionada por média-k das imagens aerogeofísicas em relação aos pontos de treinamento de cada modelo. Da mesma forma, calculou-se o contraste normalizado das Componentes Principais geradas da ACP das imagens aerogeofísicas. Para tanto, reclassificou-se essas imagens em nove classes de acordo com a distribuição quantitativa. Esta classificação foi escolhida, porque visualmente as Componentes Principais apresentaram uma boa distribuição espacial dos dados. Também calculou-se o contraste normalizado dos domínios litogeofísicos em relação aos modelos. A utilização da classificação não supervisionada, das Componentes Principais e dos domínios litogeofísicos visam mapear o condicionante hospedeiro. Por fim, transformou-se esses mapas em mapas binários onde as classes com maior contraste normalizado e estatisticamente significantes receberam valor 1 e as outras classes, valor 0.

Condicionantes Estruturais

A partir da interpretação estrutural pode-se individualizar quatro sistemas: zona de cisalhamento São Vicente, lineamentos indiscriminados, estruturas direcionais e lineamentos indiscriminados do relevo magnético. A partir dessas feições, calculou-se a equidistância em intervalos de 100 metros até uma distância máxima de 2 km. A partir da distância acumulativa dessa feições calculou-se o contraste normalizado para cada modelo. Adotou-se esse mesmo procedimento para as estruturas interpretadas de direção NE e NW, bem como do conjunto das estruturas indiscriminadas, direcionais e relacionadas à zona de cisalhamento São Vicente.

Da mesma forma, calculou-se o contraste normalizado da equidistância acumulativa das estimativas de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler, de acordo com as sete classes resultantes da classificação desse dados a partir da média \pm o desvio padrão do logaritmo da profundidade estimada. Assim como efetuado nos condicionantes das rochas hospedeiras, transformou-se os mapas derivados das estruturas interpretadas e das estimativas de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler em mapas binários onde as classes acumulativas com maior valor de contraste normalizado possuem valor 1 e as outras classes, 0.

Esse procedimento visa compreender a influência geométrica e em profundidade das estruturas nos modelos conceituais apresentados anteriormente. O critério adotado para selecionar a melhor estrutura no modelo engloba o critério restritivo. Na seleção do intervalo das estimativas de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler, aplicou-se também o critério restritivo. Assim, por exemplo, no modelo conceitual 1, as estimativas de profundidade apresentam alta correlação com a mineralização nos intervalos de 0 a 230 metros e maiores que 1640 metros. Calculou-se o contraste padronizado para esses intervalos simultaneamente, mas mesmo assim, o valor calculado é inferior ao observado no intervalo de 0 a 60 metros de profundidade. Seguindo o critério conservador, escolheu-se as estimativas de profundidade de fontes magnéticas no intervalo de 0 a 60 metros.

Condição de Independência dos Dados

O teste utilizado para calcular a condição de independência dos mapas binários consiste do teste χ^2 com um grau de liberdade. Nesse caso, se o valor de χ^2 calculado for menor que 5,4, não há motivo para rejeitar a hipótese de condição de independência entre as camadas de dados binários para um nível de confiança de 98%. O mapa binário derivado da classificação não supervisionada por média-k apresenta valor 15,77 no teste χ^2 em relação ao mapa derivado da segunda componente principal e 16,24 em relação ao mapa binário derivado dos domínios litogeofísicos. O mapa binário derivado dos domínios litogeofísicos foi utilizado na modelagem por apresentar contraste padronizado igual a 10,47, valor muito superior ao calculado para o mapa derivado da segunda componente principal que apresenta valor igual a 3,2 e 5,18 para o mapa binário derivado da classificação não supervisionada. Utilizando o teste de ajuste global para avaliar a condição de independência dos dados Bonham-Carter (1994), o modelo não violou a margem de segurança de 15%.

Resultados e Conclusões

O modelo estudado mostra quatro cenários prospectivos (Figura 4). O primeiro corresponde ao cenário caracterizado pela mina de Brumadinho que é mapeada pela unidade litogeofísica que se correlaciona com a Formação Quebra-Osso (Figura 4- C1). O cenário mina de Brumal/Cachimbo caracteriza as minas do tipo BIFs

que apresenta probabilidade *a posteriori* 21 vezes maior que *a priori* onde são mapeadas pelas unidades litogeofísicas correlacionadas às formações Quebra-Osso e Córrego do Ouro Fino, pelas estimativas de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler-3D (120 a 230 metros) e, por fim, pelas estruturas interpretadas como lineamentos indiferenciados ou estruturas direcionais (Figura 4- C2). Outro cenário que mapeia os BIFs da Formação Córrego do Ouro Fino é caracterizado pelas minas Severino, Morro da Mina, Ouro Fino e Raposos e é mapeado pelas unidades litogeofísicas que se correlacionam com essa formação e com as estimativas de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler. A mina Santana do Morro apresenta esse mesmo cenário porém se diferencia pois é mapeada pela unidade litogeofísica que se correlaciona com a Formação Quebra-Osso. Esse cenário apresenta probabilidade *a posteriori* 8 vezes maior que *a priori* (Figura 4- C3). O último cenário mapeia as minas em zona de cisalhamento, são elas: Bahu, São Vicente, Paciência, Cedro e Tapera. Esse cenário caracteriza-se pelas estimativas de fontes magnéticas por deconvolução de Euler-3D e pelas estruturas interpretadas como zona de cisalhamento São Vicente e lineamentos indiferenciados. Esse cenário apresenta probabilidade *a posteriori* 2,5 vezes maior que *a priori* (Figura 4- C4).

Referências Bibliográficas

- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario. Pergamon Press. 398 p.
- Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P. & D.F. Wright. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54: 1585-1592.
- Fuck R.F. 2001, Reprocessamento dos Dados Aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas. Relatório bolsa RHA. CNPq.
- Kemp L.D. Bonham-Carter G.F. Raines G.L. and Looney C.G. 2001. Arc-SDM: Arcview extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis. <http://ntsर्व.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>.
- Pinto P.C. 1996. Explanatory notes / Rio das Velhas project. Rel. téc. DNPM – SUREG/BH.
- Silva A. M. 1999. Geophysical and Geological Data Integration Using a New Statistical Approach for Mineral Target Selection Applied to the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 195p.
- Teixeira A. M. 2003. Integração de Dados Multi-fontes para Exploração de Ouro no Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 157p.

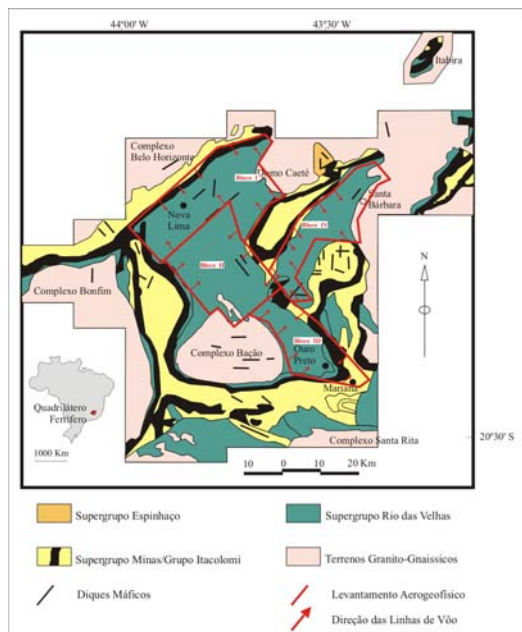


Figura 1 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, MG (Modificado de Dorr 1969 in Silva 1999).

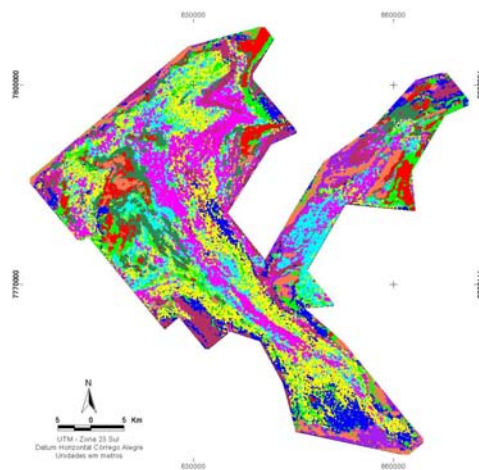


Figura 3 – Classes resultantes da aplicação da técnica de classificação não supervisionada por média-k. Legenda: Classe 1: vermelho, Classe 2: verde claro, Classe 3: azul marinho, Classe 4: amarelo, Classe 5: ciano, Classe 6: magenta, Classe 7: marrom escuro, Classe 8: verde escuro, Classe 9: roxo e Classe 10: marrom claro.

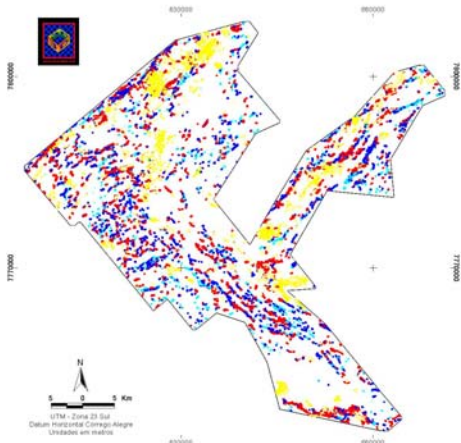


Figura 2 – Mapa de estimativa de profundidade de fontes magnéticas por deconvolução de Euler. Legenda: Muito Raso, Raso (ciano claro), Pouco Raso (ciano escuro), Pouco Profundo (azul), Profundo (vermelho), Médio Profundo (amarelo claro), Muito Profundo (amarelo escuro).

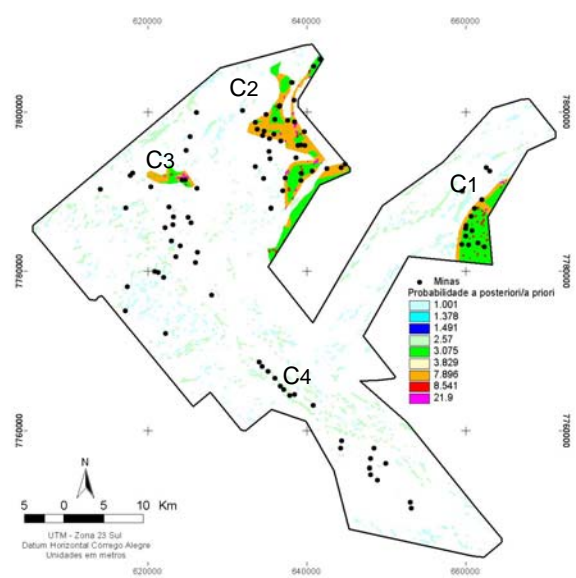


Figura 04- Modelo de Previsão gerado para o *Greenstone Belt* Rio das Velhas, utilizando 127 pontos de treinamento, representados pelos pontos em preto na área trabalhada. Notar que o modelo mapeia mineralizações e rochas hospedeiras em regiões onde ocorrem rochas máficas e ultramáficas (Cenários 1, 2 e 3), bem como depósitos hospedados em zonas de cisalhamento tipo São Vicente (Cenário 04).