

Geotecnologias aplicadas à caracterização geológica e à prospecção de ouro hospedado em rochas metassedimentares do Grupo Jacareacanga, Província Mineral do Tapajós: estudo preliminar

Thais Andressa Carrino¹
Adalene Moreira Silva¹
Alexandre Augusto Cardoso da Silva²
Nilson Francisquini Botelho¹

¹ Universidade de Brasília - UnB
70910-900 - Brasília-DF, Brasil
thais.carrino@gmail.com; {adalene, nilsonfb}@unb.br

² Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobrás
CENPES – Rio de Janeiro-RJ, Brasil
alexandreaugusto@petrobras.com.br

Abstract. A region characterized by gold mineralizations related to Jacareacanga Group (metasedimentary and metavolcanic rocks; ~2,1 Ga), and located in the Tapajós Mineral Province (Brazil), was selected in this paper to a preliminary prospective study, based on the analysis and processing of TM/Landsat 5, airborne geophysical and altimetric (SRTM) images. The primary gold occurrences occur in quartz veins associated, in general, with paleoproterozoic schists. The research focused the structural interpretation through the drainage and lineaments extraction using the multispectral image. Magnetic lineaments and gamma-ray spectrometry units were interpreted visually, respectively, with the analytical signal amplitude and images of K, eTh, eU, total count, and K/eTh, K/eU ratios. It was possible to observe mafic dike swarms in the region of gold occurrences, as well as to characterize the metasedimentary host rocks by high values of K, and medium to low values of eTh and eU. How the first tentative to determine new regional targets to the gold exploration, the gamma-ray spectrometry images were selected, as well as the geophysical signatures of four gold occurrences identified by CPRM. With these data, the Spectral Angle Mapper and Mixture Tuned Matched Filtering techniques, first developed to the hyperspectral remote sensing, were applied, producing preliminary maps to the study about the gold potential related to the paleoproterozoic metasedimentary rocks of this Tapajós region.

Palavras-chave: remote sensing, airborne geophysics, Spectral Angle Mapper, Mixture Tuned Matched Filtering, gold mineralizations, sensoriamento remoto, aerogeofísica, *Spectral Angle Mapper*, *Mixture Tuned Matched Filtering*, mineralizações de ouro.

1. Introdução

O arcabouço geológico da região da Província Mineral do Tapajós (PMT - AM/PA) (Figura 1 (a)), inserida no Cráton Amazônico, é caracterizado por grande geração de crosta continental entre 2,00 Ga a 1,96 Ga (ambiente compressivo) e entre 1,90 a 1,87 Ga (ambiente distensivo), envolvendo eventos como acreção e encurtamento crustal relacionados à formação de um ou mais arcos magmáticos a um protocráton arqueano (Klein et al., 2001).

Dentre as mineralizações auríferas primárias existentes nessa província, este artigo aborda um segmento oeste no qual o ouro encontra-se hospedado em metaturbiditos do Grupo Jacareacanga (Santos et al., 2001a), ou, de acordo com a classificação proposta por Klein et al. (2001), associado a estruturas dúcteis e rúpteis-dúcteis (Figura 1). A metodologia proposta

inclui o processamento e investigação de dados multifonte como forma de contribuição ao conhecimento geológico e à prospecção de ouro desta porção da Província Tapajós.

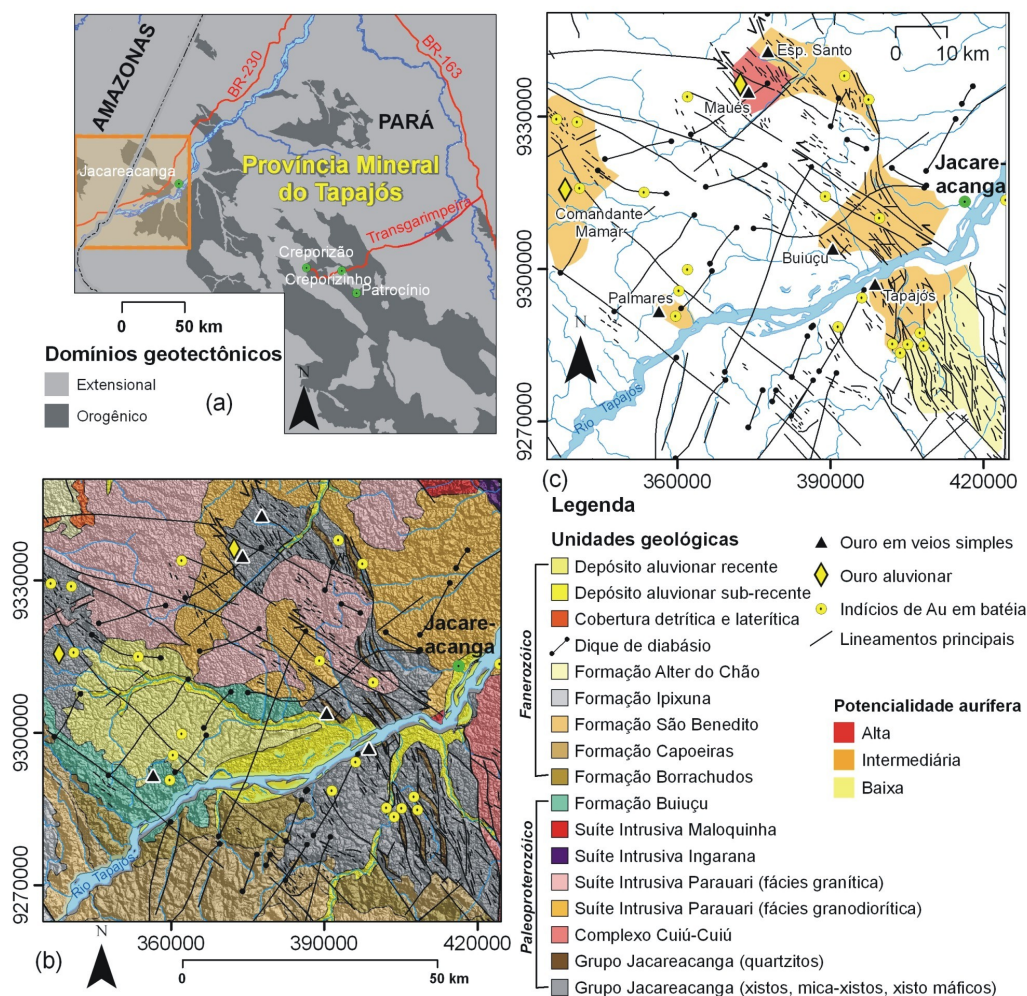


Figura 1. (a) Localização da área de estudo na porção sudoeste da Província Mineral do Tapajós. (b) Mapa geológico sobreposto ao modelo digital de elevação do SRTM e (c) mapa do potencial aurífero (Klein et al., 2001).

O Grupo Jacareacanga (~2,1 Ga) compreende uma associação de rochas metassedimentares e metavulcânicas de baixo grau metamórfico, como mica xistos, mica-quartzo xistos, actinolita xistos, talco xistos, quartzitos, metacherts, metargilitos, metagrauvacas e filitos. As mineralizações auríferas são representadas pelos garimpos Maués, Espírito Santo, Buiuçu, Comandante Mamar e Palmares, e caracterizadas por raros veios simples e vênulas de quartzo encaixados em xistos e envoltos por granitos da Suíte Intrusiva Parauari (~1,95 Ga) (Figura 1 (b)). A este granito é creditada a origem dos fluidos hidrotermais que geraram os veios de quartzo auríferos. A existência de *hornfels* nos xistos em contato com esta unidade é tratada como evidência para esta hipótese (Klein et al., 2001).

O maior potencial para ouro equivale à região dos alvos primários Maués e Espírito Santo (Figura 1 (c)). No garimpo Maués foi verificada uma pureza do ouro de até 94%, sendo a extração do minério compreendida no nível de cascalho (quartzo leitoso) que se situa acima de xisto alterado (Klein et al., 2001). Este xisto é caracterizado por lentes de quartzo friável e concordantes com a xistosidade regional (N11-20W/90-85SW), além de veios de quartzo com até 3 cm de espessura. Santos et al. (2001a) constataram, no garimpo Maués, ouro em veios disseminados e formados durante o período de transpressão, marcado por transporte tectônico NW-SW (N20W). Os corpos mineralizados apresentam-se retrabalhados em evento posterior

marcado por deformação dúctil de movimentação sinistral (N-S). Na área do garimpo primário Buiucu, veios de quartzo possuem direção E-W/90 e cortam xistos dispostos a N60W/90. O garimpo Tapajós também está incluso neste domínio, marcado por um potencial moderado a baixo para a prospecção de ouro (Klein et al., 2001; cf., Figura 1 (c)). A área aurífera Comandante Mamar é representada pela exploração de ouro secundário em aluvião de pequeno porte. Klein et al. (2001) verificaram que as rochas no leito de igarapés consistem em arcóseo lítico e grauvaca de cor cinza escuro, pouco deformados e metamorfizados em baixo grau. Ouro secundário também é explorado no garimpo Palmares, sendo ambas as áreas caracterizadas por potencial aurífero moderado (Figura 1 (b, c)). Alterações hidrotermais compreendem a sulfetação, muscovitização e argilização (Klein et al., 2001).

Nas rochas do Grupo Jacareacanga, a foliação apresenta-se subparalela aos lineamentos e zonas de cisalhamento do sistema de falhas transcorrentes da PMT (NNW-SSE e NW-SE) (Figura 1 (b)). Lentes de quartzitos e *boudins* de quartzo são comuns (Almeida et al., 2001). Segundo Santos et al. (2001a), a constatação de regime tectônico dúctil e grau metamórfico inserido no fácies xisto verde a anfíbolito baixo nas rochas metassedimentares do Grupo Jacareacanga permite enquadrar os depósitos de ouro aí hospedados à gênese associada às maiores profundidades em comparação às demais ocorrências auríferas da província Tapajós.

2. Materiais

A imagem do sensor TM/Landsat 5, órbita/ponto 229/65, de 23/06/1997, e com resolução espacial de 30 m, foi selecionada ao estudo, assim como uma imagem do modelo digital de elevação do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), obtida no ano 2000 pelo ônibus espacial *Endeavour*, e com resolução espacial aproximada de 90 m. Os dados aerogeofísicos foram adquiridos em 1997 pela CPRM, consistindo em dados gamaespectrométricos e magnetométricos do Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós, coletados em altura de vôo de 100 m e espaçamentos das linhas de vôo (N-S) e de controle (E-W), respectivamente, de 1 k e 13 km.

3. Abordagem metodológica

3.1. Imagens multiespectrais, aeromagnetométricas e aerogamaespectrométricas

As imagens TM/Landsat5 e SRTM, com o uso das folhas topográficas Vila Mamãe Anã e Jacareacanga (1:250.000), foram georreferenciadas a partir da estipulação de pontos de controle. A imagem multiespectral foi empregada para a interpretação visual da rede de drenagem, seguindo-se da identificação de lineamentos e dos principais alinhamentos de drenagem (Santos et al., 2001b) (Figura 2 (a, b)).

Os dados aeromagnetométricos foram processados por Silva (2003) utilizando o método de curvatura mínima e determinando-se o tamanho da célula do *grid* em 250 m. Posteriormente, os dados foram micronivelados utilizando o algoritmo de Blum (1999). A partir da malha do campo magnético anômalo micronivelada, foram calculadas as derivadas horizontais em x (DX) e y (DY), e a primeira derivada vertical (DZ), para geração da imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) (Nabighian, 1972) (Figura 2 (c)). Os canais de contagem total, K, eTh e eU também foram interpolados utilizando-se a curvatura mínima e posteriormente micronivelados (Silva, 2003). As malhas dos radioelementos K, eTh e eU foram combinadas produzindo-se uma imagem ternária a partir do uso do espaço de cores RGB (vermelho-verde-azul). Esta imagem foi sobreposta ao modelo digital de elevação do SRTM, anteriormente submetido à filtragem direcional de ângulo de elevação solar e zenital de 45° (Figura 2 (d)). Silva (2003) efetuou os cálculos das seguintes razões entre os radioelementos: K/eTh e K/eU, que também foram selecionadas nesta presente pesquisa.

3.2. Respostas geofísicas das ocorrências de ouro associadas ao Grupo Jacareacanga

A extração das respostas geofísicas das ocorrências auríferas foi realizada da seguinte maneira: (1) as imagens de K, eTh, eU, contagem total, e das razões K/eTh e K/eU foram re-escaladas a 8 bits (256 níveis de cinza) com a finalidade da manutenção da integridade dos dados originais que possuem escala de medidas diferenciadas; e (2) extração das assinaturas geofísicas pontuais das ocorrências primárias identificadas pela CPRM (Maués, Espírito Santo, Buiuçu e Tapajós), correspondentes ao pixel (tamanho de 250 m) associado. As respostas geofísicas podem ser observadas na Figura 3 (a).

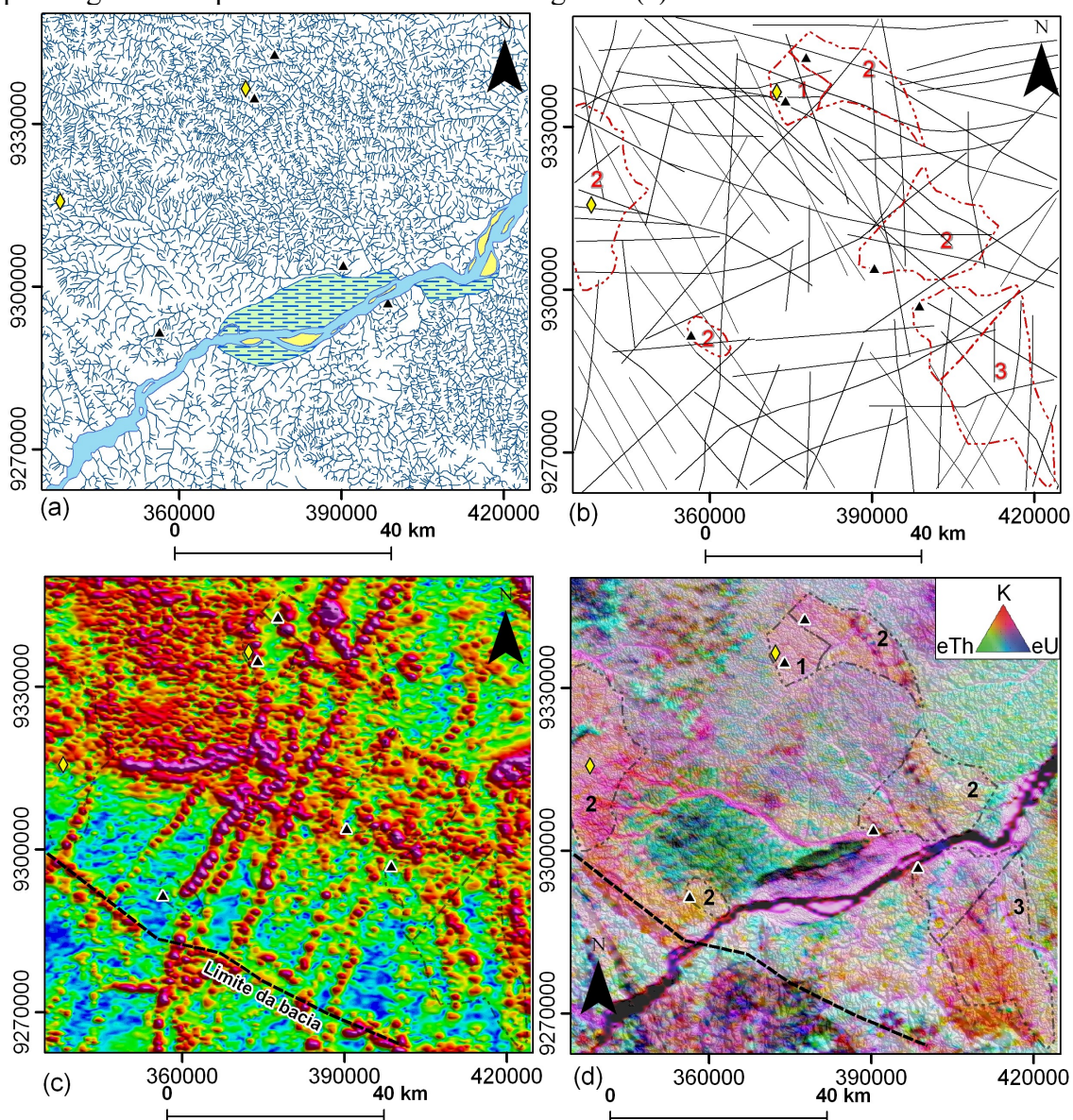


Figura 2. (a) Drenagem interpretada com base na imagem do sensor TM; (b) principais alinhamentos de drenagem; (c) imagem da amplitude do sinal analítico; (d) imagem ternária (RGB) dos canais de K, eTh e eU, sobreposta à imagem altimétrica do SRTM. 1 – potencial alto; 2 – potencial moderado; 3 – potencial baixo para ouro de acordo com Klein et al. (2001).

3.3. Classificação de alvos potenciais para ouro – estudo preliminar

A utilização de métodos de classificação supervisionada, como o *Spectral Angle Mapper* (SAM) e o *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF), com base no uso de imagens geofísicas aéreas, já foi discutido em exemplos geológicos para a prospecção mineral em trabalhos como o de Carrino et al. (2007), Miethke et al. (2007) e Zacchi et al. (2007).

O SAM consiste em um método classificador na escala do pixel baseado na vetorização dos pixels das imagens e do *endmember*, que compreende o dado de referência, podendo ser medida espectral, geofísica, geoquímica entre outras. A comparação dos pixels da imagem com o *endmember* é estabelecida por meio do ângulo de similaridade, medido em radianos, e que deve possuir o menor valor possível, significando maior semelhança entre ambos. O resultado é dado por uma imagem em tons de cinza (*rule*) e a colorida classificada (Kruse et al., 1993).

O MTMF compreende um método classificador que mapeia a abundância do *endmember* na escala do subpixel, utilizando-se dois filtros. O *Matched Filtering*, que maximiza a resposta do *endmember* (MF Score), e o *Mixture Tuned*, que remove as assinaturas desconhecidas (*background*) (Boardman et al., 1995). Um gráfico bi-dimensional da dispersão dos pixels das imagens MF Score e *Infeasibility* (improbabilidade) é originado, e neste são determinados os pixels mais semelhantes ao *endmember*, também denominados de 'pixels puros', consistentes com altos valores da imagem MF Score em contrapartida à baixa improbabilidade.

Esses dois métodos foram selecionados ao estudo preliminar para detecção de alvos regionais similares às ocorrências auríferas primárias hospedadas no Grupo Jacareacanga. Desta maneira, os seguintes procedimentos foram realizados:

(1) as respostas geofísicas da Figura 3 (a) foram utilizadas como *endmembers* no emprego das duas classificações supervisionadas.

(2) as imagens de entrada consistiram nas interpolações dos canais de K, eTh, eU, contagem total, e das razões K/eTh e K/eU.

(3) aplicação das técnicas SAM e MTMF. Para o SAM, foi determinado o ângulo de similaridade equivalente 0,05 radianos, produzindo-se a imagem *rule* (cujos valores baixos, mostrados pelos pixels escuros, são os mais similares aos *endmembers*), e a imagem classificada (Figuras 3 (b, c)). No caso do MTMF, foram geradas as imagens MF Score e *Infeasibility*, a partir das quais foi produzido o gráfico da Figura 3 (a). Neste gráfico do tipo *Infeasibility versus* MF Score, manualmente foram selecionados os pixels puros, ou seja, aqueles mais semelhantes aos *endmembers*. Esta escolha está registrada no histograma da imagem MF Score, também mostrada na Figura 3 (a), cujos pixels selecionados compreendem aqueles com maiores valores na imagem MF Score. O resultado da aplicação da técnica MTMF está visualizada na Figura 3 (d).

Adicionalmente, os resultados das classificações SAM e MTMF foram integrados à imagem da banda 4 do sensor TM e modelados em perspectiva, com o auxílio do modelo digital de elevação do SRTM. Este resultado, com ênfase na área de maior potencial aurífero mapeado pela CPRM, está apresentado na Figura 4.

4. Discussão dos resultados e conclusões preliminares

A interpretação da drenagem e dos alinhamentos associados (Figura 2 (a, b)), por meio da imagem do sensor TM, em especial a banda 4 (infravermelho próximo), realçou estruturas de direção NW-SE, principalmente nas abrangências dos garimpos Maués e Espírito Santo (direções aproximadas de N55W e N20W). Nesta área, que pode ser observada em detalhe na Figura 4, as drenagens secundárias àquelas de orientação NE-SW caracterizam-se por direção NW-SE (cf., Figura 2 (a)), a mesma tendência observada em campo da foliação de rochas do Grupo Jacareacanga aí presentes (cf., Klein et al., 2001). Nas áreas dos garimpos primários Buiuçu e Tapajós, a estruturação NW-SW ainda é perceptível, porém não na magnitude vista nas abrangências dos garimpos anteriores. No caso das regiões dos garimpos secundários Palmares e Comandante Mamar, lineamentos com orientação E-W também são visualizados (Figura 2 (b)).

A investigação da imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) (Figura 2 (c)) revela o enxame de diques máficos e quilométricos, que, segundo a CPRM, consiste no Diabásio Periquito (~180 Ma). Este enxame é marcado por altos valores da ASA e são caracterizados por direção NE-SW, por vezes infletindo-se para N-S como analisado nas abrangências dos garimpos Maués e Espírito Santo, por exemplo. Outra importante feição estrutural consiste no lineamento proeminente de direção N60W na porção sudoeste da área. Este lineamento magnético foi inicialmente identificado por Silva (2003) e está relacionado ao limite da província com a bacia do Cachimbo (a sudoeste). No geral, as respostas magnetométricas nos domínios da ocorrência das rochas do Grupo Jacareacanga compreendem baixas amplitudes da ASA. Alguns valores médios a altos da ASA podem ser observados, mas são decorrentes da influência dos diques de diabásio que frequentemente cortam esta unidade litoestratigráfica.

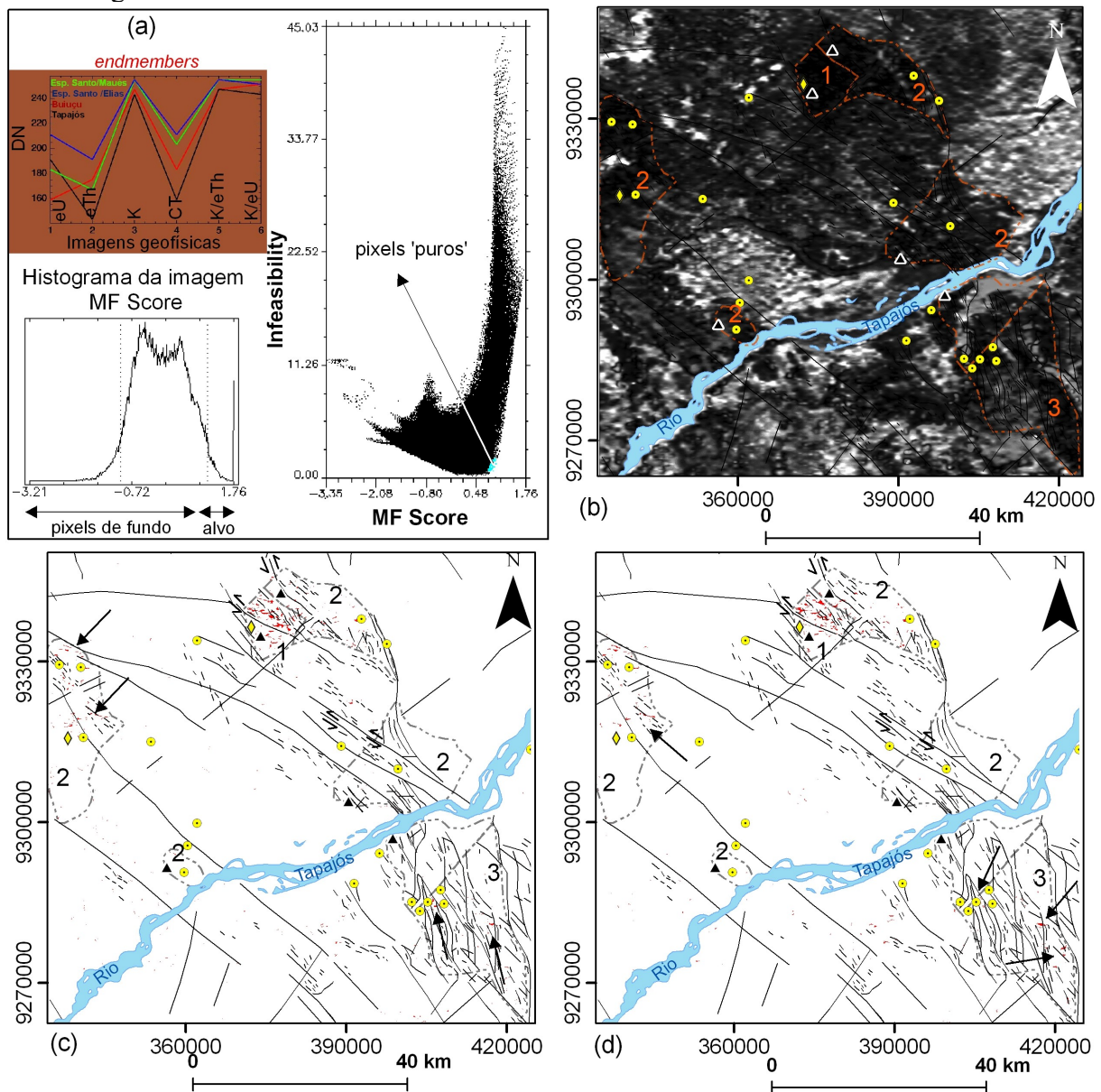


Figura 3. (a) Assinaturas geofísicas das ocorrências auríferas (*endmembers*), histograma da imagem *MF Score* e gráfico para seleção manual de pixels mais semelhantes aos *endmembers*, por meio da técnica MTMF. (b) Imagem *rule* derivada da aplicação da técnica SAM (pixels escuros equivalem aos mais semelhantes aos *endmembers*). Imagens classificadas pelas técnicas SAM (c) e MTMF (d), onde pixels vermelhos indicam as áreas

potenciais realçadas. 1 – potencial alto; 2 – potencial moderado; 3 – potencial baixo para ouro (cf., Klein et al., 2001).

A Figura 2 (d) mostra a imagem ternária dos canais de K, eTh e eU em RGB. Nesta imagem, pode-se discriminar as respostas típicas das rochas metassedimentares do Grupo Jacareacanga que, no geral, caracterizam-se por altos valores de K, médios de eU e médios a baixos de eTh. Variações locais do conteúdo dos radioelementos podem ser verificadas. Destaca-se que estas assinaturas gamaespectrométricas interpretadas visualmente correlacionam-se com a quantificação das respostas geofísicas associadas às quatro ocorrências de ouro primário (garimpos Espírito Santo, Maués, Buiuçu e Tapajós) conforme indicado na Figura 3 (a). A tendência quantificada dos valores de K, eTh, eU revela, novamente, algumas variações nos teores a cada ocorrência pontual aurífera. As respostas da contagem total também foram extraídas, indicando uma tendência de médios valores. Já as assinaturas das razões K/eTh e K/eU são caracterizadas por altos valores.

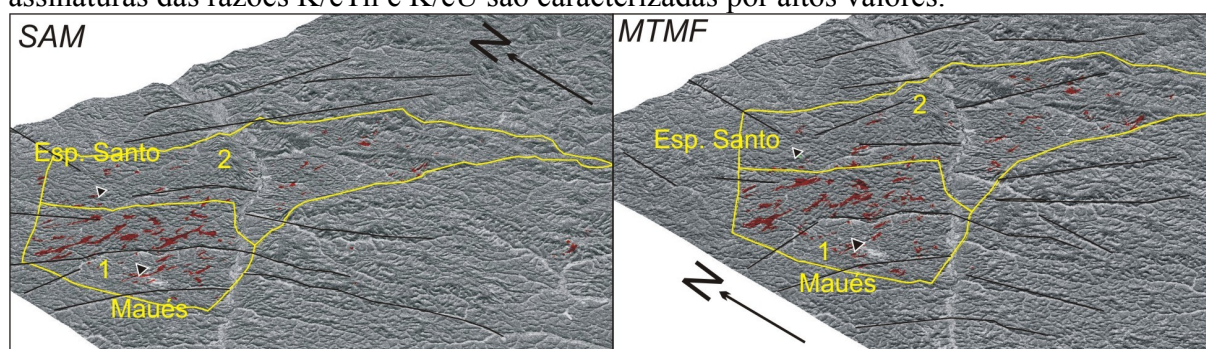


Figura 4. Perspectiva da principal área potencial para ouro, por meio da fusão do modelo digital de elevação do SRTM com a banda 4 do sensor TM, incluindo-se os resultados das classificações SAM e MTMF e os principais lineamentos. Pixels vermelhos realçam alvos favoráveis. 1 – potencial alto; 2 – potencial moderado para ouro segundo Klein et al. (2001).

A partir das assinaturas gamaespectrométricas (Figura 3 (a)), estas foram usadas como *endmembers* para aplicação das classificações SAM e MTMF, e assumidas como primeiro passo para identificação de possíveis novos alvos para a prospecção de ouro. Os resultados são preliminares uma vez que dados de campo não foram considerados. As duas classificações, SAM e MTMF, embora baseadas em algoritmos diferenciados, realçaram alvos similares, sobretudo nas abrangências dos garimpos Maués e Espírito Santo, observadas em detalhe na Figura 4. Nesta figura, a integração dos resultados de classificação com os principais lineamentos, permite a identificação, ainda que preliminar, da tendência das áreas realçadas com o *trend* NW-SE, o qual é condicionante das rochas hospedeiras de ouro do Grupo Jacareacanga, além da associação com a área de alto potencial aurífero designada pela CPRM (Klein et al., 2001). Outra importante observação preliminar consiste na verificação desta região potencialmente classificada (Figura 4) estar localizada na área de contato das rochas hospedeiras do Grupo Jacareacanga com os granitos da Suíte Intrusiva Parauari, os quais foram assumidos por alguns autores como a fonte de fluidos hidrotermais que originaram veios de quartzo auríferos nos xistos de 2,1 Ga (cf., Klein et al., 2001).

As discussões dos resultados e conclusões preliminares assumidas neste artigo para a identificação de novos alvos exploratórios de ouro nesta porção oeste da Província Mineral do Tapajós servem de apoio à etapa posterior de investigação que consistirá na integração dos dados multifonte e interpretações aqui realizadas com dados coletados em campo. Desta maneira, novas considerações e o uso de informações de campo para determinação de alvos com base nas classificações hiperespectrais aplicadas à geofísica favorecerão resultados mais acurados para esta pesquisa prospectiva.

Agradecimentos

Thais Andressa Carrino agradece à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado e ao Laboratório de Geofísica Aplicada-UnB pelo suporte técnico. Os autores agradecem à CPRM-DIGEOF pela cessão dos dados aerogeofísicos.

Referências bibliográficas

Almeida, M.E.; Ferreira, A.L.; Brito, M.F.L.; Monteiro, M.A.S. Evolução tectono-estrutural da Província Tapajós com base na geologia das Folhas Vila Mamãe Anã e Jacareacanga (1:250.000), região limítrofe dos Estados do Amazonas e Pará. In: Reis NJ & Monteiro MAS (Coord.) **Contribuições à geologia da Amazônia**. Manaus: SBG-Núcleo Norte, 2001, v. 2, p. 57-114.

Blum, M.L. **Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral**. 1999. 229 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 1999.

Boardman, J.W.; Kruse, F.A.; Green, R.O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: **Summaries**, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop. JPL Publication 95-1, v. 1, p. 23-26, 1995

Carrino, T.A.; Souza Filho, C.R.; Leite, E.P. Aplicação de técnicas de classificação espectral a dados magnetométricos e gamaespectrométricos para mapeamento de áreas favoráveis a mineralização de EGP na região de Serra Leste, Província Mineral de Carajás (Pará). In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 10., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2007, em CD-ROM.

Klein, E.L.; Almeida, M.E.; Vasquez, M.L.; Bahia, R.B.C.; Santos, M.L.E.; Ferreira, A.L. **Geologia e recursos minerais da Província Mineral do Tapajós. Folhas Vila Mamães Anã (SB.21-V-D), Jacareacanga (SB.21-Y-B), Caracol (SB.21-X-X), Vila Riozinho (SB.21-Z-A) e Rio Novo (SB.21-Z-C)**. Estados do Pará e Amazonas. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001, 81 p. 2001

Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B.; Boardman, J.B.; Heidebrecht, K.B.; Shapiro, A.T.; Barloon, P.J.; Goetz, A.F.H. The Spectral Image Processing Systems (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, 1993, v. 44, p. 145-163.

Nabighian, N.M. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation, **Geophysics**, 1972, v. 37, p. 507–517.

Miethke, C.; Souza Filho, C.R.; Silva, A.M. Assinatura geofísica e modelos prospectivos 'knowledge-driven' de mineralizações de Au no lineamento Congonhas, sul do Cráton São Francisco, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, 2007, v. 37, n. 3, p. 490-503.

Santos, J.O.S.; Groves, D.I.; Hartmann, L.A.; Moura, M.A.; McNaughton, N.J. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. **Mineralium Deposita**, 2001a, v. 36, p. 278-299.

Santos, A.R.; Paradella, W.R.; Veneziani, P.; Morais, M.C. **Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001b, 103 p. (INPE-8117-PUD/45).

Silva, A.A.C. **Processamento, interpretação e integração de dados geológicos e geofísicos da Província Mineral do Tapajós**. 2003. 137 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF. 2003.

Zacchi, E.N.P.; Silva, A.M.; Rolim, V.K.; Portugal, R.S. Aplicação de técnicas de sensores remotos multiespectrais e hiperespectrais em dados aerogeofísicos visando a seleção de alvos para a prospecção de minério de ferro na Serra do Espinhaço Meridional, MG In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 10., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2007, em CD-ROM.