

Assinaturas geofísicas da região da zona de cisalhamento Chico Torres, Província Mineral do Tapajós, e geração de modelos previsionais para ouro

Thais Andressa Carrino (LGA-UnB), Adalene Moreira Silva (LGA-UnB), Nilson Francisquini Botelho (UnB), Alexandre Augusto Cardoso da Silva (PETROBRAS)

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent 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

This paper uses SAR-R-99B and airborne geophysics data to the reconnaissance of the geology and the gold mineralization context of the Tapajós Mineral Province northwestern portion (Pará and Amazon states - Brazil). This region is characterized by Chico Torres shear zone. Based on the SAR image, drainages were interpreted, beyond main lineaments and alignments of drainages. Using analytic signal amplitude, magnetic lineaments and units were identified, like mafic dike swarms characterized by NNE-SSW direction. The images of K, eTh, eU, eTh/K, eU/K, F parameter, anomalous K, and normalization of K were producing, beyond the color compositions. These products allowed the visual interpretation of the gamma-ray spectrometric units characterized by possible hydrothermal origin, and correlated with interpretation of structures identified by remote sensing. Other step utilized consisted in the application of fuzzy logic for the selection of potential hydrothermalized areas. It was possible to enhance targets associated with Chico Torres shear zone, identifying trends NW-SE related to high hydrothermal K.

Introdução

A Província Mineral do Tapajós (AM/PA) (Figura 1), localizada na porção centro-sul do cráton Amazônico, compreende um segmento de crosta continental formada no período de acreção juvenil no paleoproterozóico, entre aproximadamente 2,0 Ga e 1,8 Ga. Os depósitos auríferos relacionados com o desenvolvimento de zona de transcorrência exibem amplas zonas de alteração (carbonatação, sericitização e silicificação - e.g., garimpos Ouro Roxo, São José, Chico Torres, Abacaxis), enquanto que nas áreas mineralizadas originadas sob condição rúptil, o contato entre os veios de quartzo mineralizados e rocha encaixante é caracterizado por zonas de alteração menos expressivas (Coutinho et al. 2008).

A área de estudo consiste numa porção noroeste da província, caracterizada por transcorrência incluída, segundo a denominação proposta por Coutinho et al. (2008), no *trend* aurífero São Jorge-Chico Torres. O *trend* NW-SE, o qual relaciona-se à instalação da zona de cisalhamento Chico Torres (cf., Figura 1), compreende

uma zona de transcorrência dextral do sistema de falhas transcorrentes do Tapajós. Na área de estudo, consiste na região de influência de garimpos como Chico Torres, Maranhense, Porquinho.

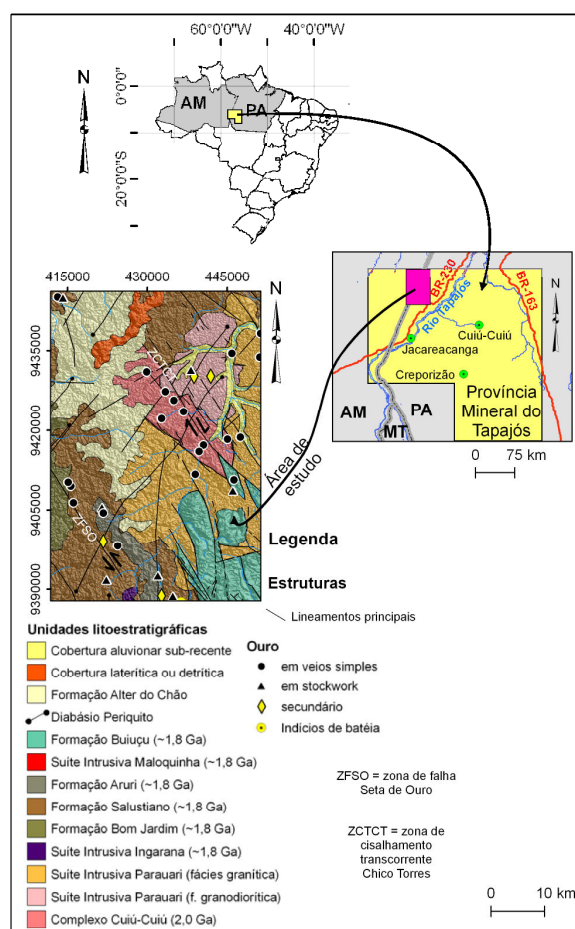


Figura 1. Localização da área de estudo na Província Mineral do Tapajós e mapa geológico modificado de Klein et al. (2001).

As rochas mais antigas da área de estudo (Figura 1) consistem em ortogneisses e granitos pouco deformados do Complexo Cuiú-Cuiú (2,00 Ga), assumidos como registro de arco vulcânico. A Suíte Intrusiva Parauari (~1,95-1,88 Ga) é caracterizada pelas fácies granítica e granodiorítica. A Suíte Intrusiva Ingarana compreende diabásios, gabro-noritos, dioritos, monzodioritos e granófiros (~1,8 Ga). Rochas vulcânicas de composição intermediária, como andesitos, andesitos basálticos, traquiandesitos e latitos estão incluídos na Formação Bom Jardim (~1,8 Ga). O Supergrupo Uatumã abrange litotipos do Grupo Iri e da Suíte Intrusiva Maloquinha

que consistem, respectivamente, em rochas vulcânicas e plutônicas anorogênicas (~1,87-1,85 Ga). O Grupo Iriri é representado pelas formações Salustiano (rochas vulcânicas ácidas) e Aruri (rochas vulcanoclásticas), enquanto a Suíte Intrusiva Maloquinha é caracterizada por sienogranitos, monzogranitos entre outros. A Formação Buiuçu abrange rochas paleoproterozóicas como arenitos arcósianos, conglomerados e siltitos. As unidades litoestratigráficas fanerozóicas consistem na Formação Alter do Chão (arenitos avermelhados, silicificados e ferruginizados); diques de diabásio (Diabásio Periquito), as coberturas lateríticas e detríticas e as aluviões sub-recentes (Klein et al., 2001).

A área da zona de cisalhamento transcorrente Chico Torres (Figura 1) é caracterizada por mineralizações de ouro em veios de quartzo, com associação a sulfetos. Estes veios ocasionalmente apresentam-se deformados em função do regime dúctil instalado pela transcorrência (Klein et al., 2001). Regiões hidrotermalizadas são verificadas ao longo da zona de cisalhamento e em rochas hospedeiras como os ortognaisses do Complexo Cuiú-Cuiú (garimpos Porquinho, e algumas lavras do Chico Torres), em granitos da Suíte Intrusiva Parauari (garimpos Chico Torres, Nova Chico Torres, Cara Preta, Maranhense) e vulcânicas Iriri (lavra Melechete do garimpo Chico Torres) (Klein et al., 2001). Há o predomínio de alterações hidrotermais como a silicificação, sulfetação, cloritização, sericitização e epidotização. São observados controles estruturais de direção NE-SW e NW-SE e mergulhos verticais e subverticais (Klein et al., 2001).

Amostras de sulfetos (pirita e galena) em veios de quartzo portadores de ouro do garimpo Chico Torres, foram datadas pelo método Pb-Pb, revelando uma idade de 1939 Ma. Os veios de quartzo apresentam-se intercalados em granito (Complexo Cuiú-Cuiú), com sulfeto e ouro disseminados. Veios com direção N40°W são controlados por transcorrência dextral. A alteração hidrotermal predominante neste garimpo compreende a filica com domínio de sericita (Coutinho et al. 2008).

Em função da disponibilidade de dados de radar de abertura sintética, aerogeofísicos, além de uma base de dados geológicos disponíveis em Klein et al. (2001) e revistos em Coutinho et al. (2008), a região da zona de cisalhamento Chico Torres foi selecionada para um estudo e caracterização preditiva de mineralizações auríferas.

Materiais

Foram selecionados dados de radar de abertura sintética (SAR) adquiridas pela aeronave R-99B. Compreendem segmentos imageados em banda L (Lhh, Lhv, Lvh, Lvv), com resolução espacial de 18 x 18 m e tamanho de pixel de 15 m, provenientes da missão Terra do Meio Oeste. A altura de aquisição equivaleu a 35.000 pés e foram empregados 8 looks e ângulo de incidência (*near ao far range*) variando de 45° a 81,10° (com visada para oeste).

Os dados aerogeofísicos do Bloco 1-Província Aurífera do Tapajós, foram obtidos para a CPRM em 1997. Consistem em dados com espaçamento das linhas de

vôo (N-S) e de controle (E-W) de 1 e 13 km, respectivamente, coletados em altura de vôo de 100 metros. Foi empregado o sistema Picodas, modelo PGAM, de 256 canais espectrais, com cristais de iodeto de sódio ativado a tálio, e o sistema aeromagnético Picodas PDAS 1000 acoplado a um sensor de vapor de céσιο modelo CS-12 da SCINTREX, com resolução de 0,001 nT (Lasa Engenharia e Prospecções S.A., 1998). Dados aerogeofísicos do levantamento Província Médio Tapajós da CPRM, coletados entre 1986 e 1987, são caracterizados por linhas de vôo (N-S) espaçadas entre si em 2 km, e linhas de controle (E-W) espaçadas em 20 km. A altura de vôo equivaleu a 150 m. Foi empregado o aeromagnetômetro de prótons, modelo G-803 da GEOMETRICS, e aerogamaespectrômetro modelo EXPLORANIUM DIGRS-3001, com cristais detectores de iodeto de sódio (NaI) ativado a tálio (Lasa Engenharia e Prospecções S.A., 1987).

Dados altimétricos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram selecionados. Estes são caracterizados por resolução espacial aproximada de 90 m.

Abordagem metodológica

Dados de radar (SAR-R-99B)

A imagem de radar do sensor SAR-R-99B foi avaliada visualmente, verificando-se a desfocagem (possivelmente devido a problemas na plataforma aérea) em pequenas partes dos segmentos, além da ausência do *speckle*, já que as imagens são caracterizadas pelo formato *multilook*. A correção do padrão de antena, utilizando-se uma função de grau 5, foi aplicada a fim de melhorar a radiometria da imagem. A correção geométrica foi realizada com base em 89 pontos de controle auxiliados por carta topográfica em escala 1:250.000, obtendo-se um erro de 17,58 m. As drenagens da área de estudo foram interpretadas (Figura 2 (a)), seguindo-se das feições lineares de drenagem, apresentadas sobrepostas ao modelo digital de terreno do SRTM na Figura 2 (b), além de alinhamentos de drenagem, visualizados na Figura 2 em integração IHS com imagens gamaespectrométricas.

Dados geofísicos aéreos e integrações IHS

Imagens dos canais de K, eTh, eU, e das razões eTh/K e eU/K foram produzidas por Silva (2003), que realizou o micronivelamento baseado na metodologia de Minty (1991) e aplicando o algoritmo de Blum (1999), com o uso de tamanho de célula do *grid* de 250 m (Bloco 1) e de 500 m (Médio Tapajós). A partir destas imagens, outros produtos foram gerados, como tentativa de realce de K hidrotermal em relação ao *background* geológico: (1) imagem do parâmetro F (e.g., Quadros et al., 2003), que baseia-se nas relações de abundância de K associada à razão eTh/U, e da abundância de eU relacionada à razão eTh/K; (2) imagem do potássio anômalo (Kd) (Figura 4 (a)), obtida por meio da diferença entre os valores previstos e os valores medidos de K (Pires 1995); (3) imagem do K normalizado (Kn) por meio da divisão deste radioelemento pela somatória de K, eTh

e eU. A normalização de eTh (eThn) e de eU (eUn) também foram realizadas.

Com relação às imagens gamaespectrométricas do Bloco 1, integrações do tipo IHS foram empregadas da seguinte maneira: ao canal intensidade (I) foi atribuída à imagem SAR-R-99B (Lhh), a saturação (S) foi controlada a cada caso, e a componente matiz (H) foi atribuída às imagens da combinação ternária RGB de Kn, eThn e eUn, de Kn, das razões eTh/K e eU/K, e do parâmetro F (Figura 2 (b, c, d, e, f, g)). Outro recurso utilizado consistiu na análise de perfis gamaespectrométricos, em especial das variáveis K/eTh, parâmetro F e Kn, como mostrado na Figura 4 (a, b). Este artifício permite uma observação de assinaturas com maior resolução, visto que há uma amostragem a cada 55 m. Além disso, realizou-se a interpretação de principais unidades gamaespectrométricas com base nas respostas dos

canais de K, eTh e eU (Figura 3), combinados com a imagem de radar e SRTM (Figura 4 (c)).

Dentre as imagens gamaespectrométricas produzidas do levantamento Médio Tapajós, destaca-se a composição colorida dos canais de K, eTh e eU em RGB. Este banco de dados foi integrado com a mesma imagem ternária do levantamento Bloco 1-Província Aurífera do Tapajós, para a verificação de uma possível extensão das assinaturas geofísicas relacionadas às mineralizações de ouro (Figura 5).

Silva (2003) também produziu a imagem do campo magnético anômalo e posteriores transformações lineares do mesmo, tais como: as derivadas horizontais (DX e DY) e vertical (DZ), gerando-se a imagem da amplitude do sinal analítico (ASA). A partir desta imagem, visualizada na Figura 2 (h), as principais assinaturas de amplitudes foram interpretadas, com destaque aos diques máficos de grande extensão NE-SW.

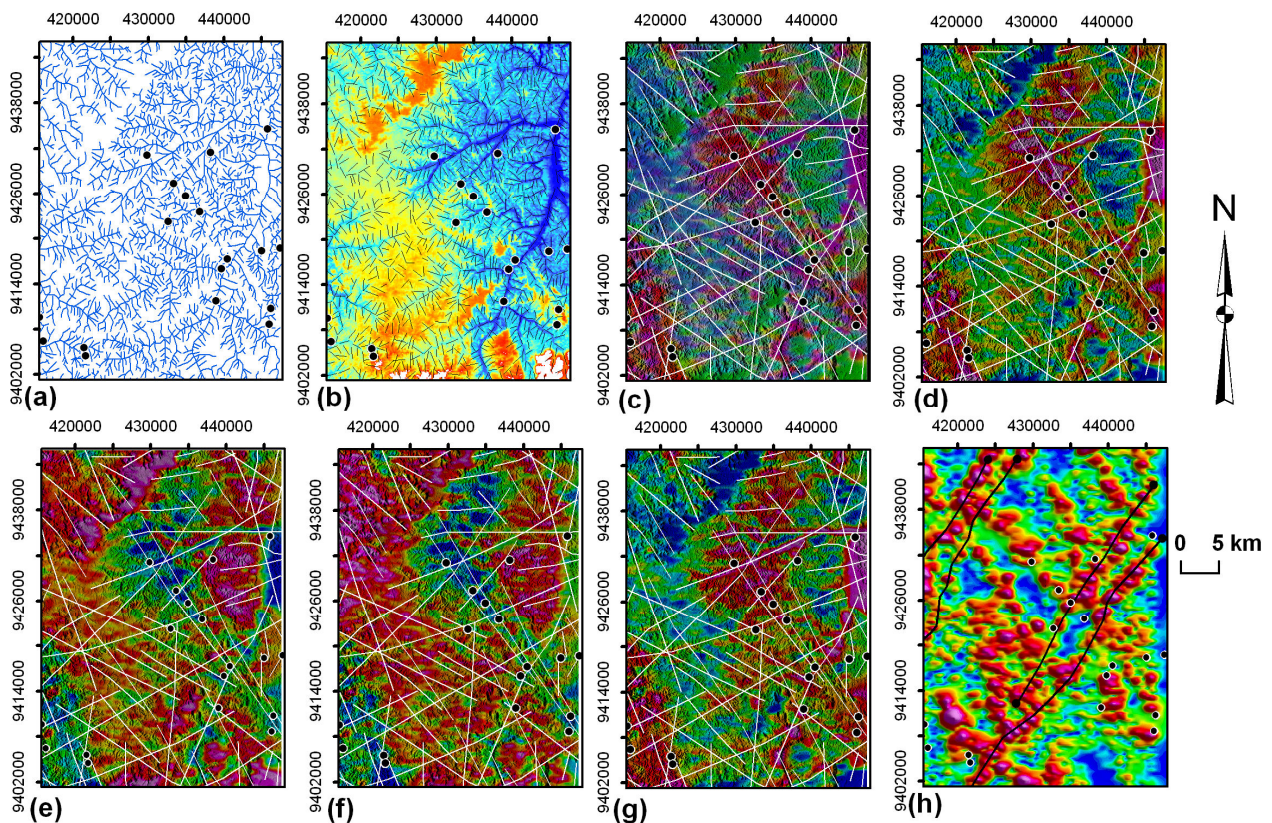


Figura 2. Interpretação de imagens multisensor: (a) drenagem interpretada com base na imagem SAR-R-99B (Lhh) e (b) feições lineares de drenagem sobrepostas à imagem SRTM em pseudo-cor. Integração IHS do SAR-R-99B (Lhh) com os principais alinhamentos de drenagem e com as seguintes imagens: (c) ternária de Kn, eThn e eUn em RGB; (d) do Kn; (e) da razão eTh/K; (f) da razão eU/K; (g) do parâmetro F. (h) Imagem da ASA.

Modelagem preditiva para ouro

A proposta da modelagem de dados espaciais de dados multifonte foca possibilidades de descobrimento de novo(s) alvo(s) exploratório(s). Dentre os modelos empíricos, a lógica *fuzzy* foi selecionada ao estudo. Esta técnica insere-se nos modelos guiados por

conhecimento, baseados no uso de quaisquer conjuntos de dados/evidências cujos pesos são controlados inteiramente pelo conhecimento do *expert* (An et al. 1991, Bonham-Carter 1994).

Desta forma, foi imprescindível a formulação de um modelo conceitual para a predição de ouro na área de

estudo. Considerando-se os trabalhos de campo realizados no PROMIN-TAPAJÓS (Klein et al., 2001) e outros trabalhos importantes (eg., Coutinho et al. 2008), notam-se típicos halos hidrotermais bem desenvolvidos, alterações na qual o K é marcante (e.g., filica, com domínio de sericita), e intenso condicionamento hidrotermal, principalmente com a disposição de veios auríferos em direções NW-SE. Frente a essas considerações, as imagens de realce do radioelemento K foram selecionadas como dados de entrada para as modelagens. No caso dos lineamentos, como observado nas Figuras 3 e 4 (c), as assinaturas delgadas provenientes da unidade gamaespectrométrica de médio a alto K refletem os próprios lineamentos principais da região de estudo e que, por sua vez, correlacionam-se às mineralizações auríferas já identificadas. Desta maneira, lineamentos gamaespectrométricos (Figura 3) ou mesmo interpretados por meio do radar (Figura 2) não foram acrescentados ao banco de dados para as modelagens, somente as imagens de Kn, Kd, parâmetro F, e razões eTh/k e eU/K.

O primeiro passo na aplicação da lógica *fuzzy* consistiu na determinação de funções de pertinência *fuzzy*, que expressam o grau de relação com respeito a algum atributo de interesse. Estas funções, cujos valores são escolhidos subjetivamente, foram estabelecidas para cada imagem gamaespectrométrica previamente rasterizada, em um processo denominado de *fuzzy*ificação: às imagens de Kn, Kd, parâmetro F, e às imagens das razões eTh/K e eU/K, estabeleceu-se uma relação de favorabilidade aos altos e baixos valores, respectivamente, dos dois conjuntos de imagens mencionados. O segundo passo compreendeu a combinação dos mapas *fuzzy*ificados por meio da escolha dos seguintes operadores *fuzzy*:

- operador produto *fuzzy*, cujo resultado gerado considera os menores valores dos cinco mapas evidenciais de entrada (Figura 6 (a))

- operador soma algébrica *fuzzy*, que resulta em um mapa com possibilidades preditivas mais 'otimistas' pois realça os maiores valores dos cinco mapas evidenciais (Figura 6 (b));

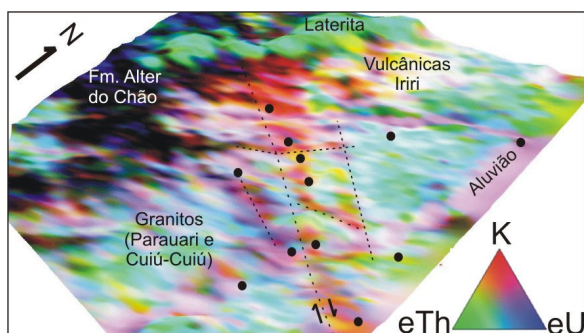


Figura 3. Modelagem tridimensional da imagem ternária de K, eTh e eU, incluindo-se a interpretação de principais lineamentos gamaespectrométricos.

- operador gama *fuzzy*, que objetiva a combinação de mapas *fuzzy*ificados, parametrizando os graus das pertinências dos mesmos, gerando resultados

intermediários entre os extremos. Este operador foi aplicado com base nas imagens produzidas com os operadores produto e soma algébrica *fuzzy*, considerando-se escolha de parâmetros gama de 0.7 e 0.9 (Figuras 6 (c, d)).

Resultados

A metodologia de identificação de drenagem, feições lineares e alinhamentos da mesma a partir da imagem de radar (Figura 2) permitiu a verificação na região da instalação da zona de cisalhamento Chico Torres, marcada por uma estruturação NW-SE contínua observada pelo condicionamento estrutural das drenagens secundárias, e que não são ambíguas a outras porções da área de estudo. Este mesmo *trend* repete-se nas imagens gamaespectrométricas geradas (Figura 2) que objetivam o realce de K em relação ao *background* geológico. Destaque é dado à imagem do K anômalo (Kd) (Figura 4 (a)), na qual foi possível interpretar dois *trend* paralelos na direção aproximada de N40°W, marcados por valores anômalos e com extensão de cerca de 46,170 km. Esta direção é a mesma da orientação de veios sulfetados auríferos constatados no garimpo Chico Torres (Coutinho et al. 2008). A imagem ternária de K, eTh, eU em RGB (Figura 3), o mapa de unidades gamaespectrométricas (Figura 4 (c)), e a integração de dados gamaespectrométricos de aerolevantamentos distintos (Figura 5), também realçam esta assinatura de alto-médio K completamente associada a ocorrências já cartografadas pela CPRM (Klein et al. 2001). Com base na Figura 5, o *trend* NW-SE verificado na área de estudo aparentemente pode ser um pouco mais extenso, com aproximadamente 60,847 km. Entretanto, somente confirmações de campo poderão refinar esta extrapolação das assinaturas gamaespectrométricas potenciais aqui reveladas. De qualquer maneira, o resultado interpretativo da Figura 5 reforça a inclusão das mineralizações de ouro na área de estudo ao mega *trend* aurífero São Jorge-Chico Torres, assim denominado em Coutinho et al. (2008).

A análise de perfis de linhas de vôo caracterizou claramente as ocorrências de ouro com os maiores valores da razão K/eTh, Kn e parâmetro F, a exemplo dos garimpos aqui indicados como Chico Torres 1 e 2. Por sua vez, assinaturas ambíguas permitiram o reconhecimento dos alvos potenciais A1 e A2.

Com relação aos modelos previsionais para ouro gerados com base na lógica *fuzzy* (Figura 6), apesar da simplicidade, foram condizentes com o modelo conceitual estabelecido, definindo-se modelos com variação ora mais 'otimistas', ora mais 'pessimistas' à seleção de alvos exploratórios. Esta seleção é dependente da natureza dos operadores *fuzzy*, conforme já caracterizados anteriormente. Uma maior cautela deve ser considerada na porção norte, a qual a existência de rochas vulcânicas ácidas Iriri permitiu a atribuição de uma alta possibilidade para alvos auríferos. Esta seleção por meio da lógica *fuzzy* não está descartada, porém a prioridade litológica na área de estudo ocorre principalmente para litotipos Cuiú-Cuiú e Parauari, e mais secundariamente para as vulcânicas (cf. Figura 1).

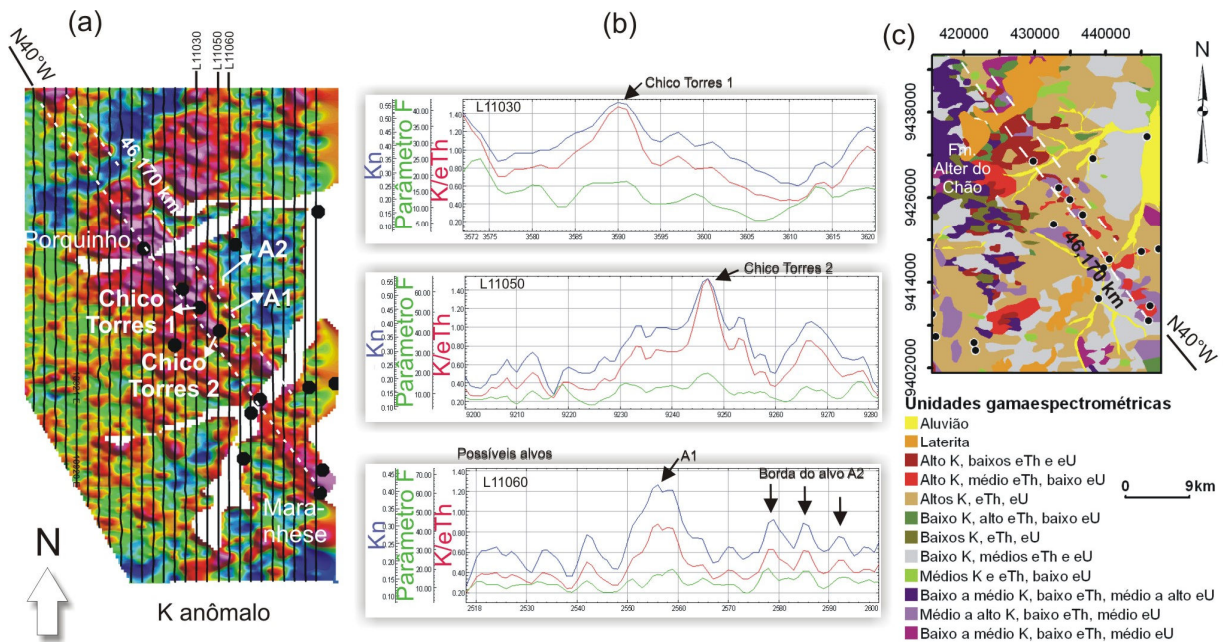


Figura 4. Processamentos e interpretações: (a) imagem do Kd; (b) perfis geofísicos da região dos alvos Chico Torres 1 e 2 e de possíveis alvos exploratórios (A1 e A2); e (c) unidades gamaespectrométricas interpretadas nas imagens de K, eTh, eU. Dois *trends* principais (NW-SE) foram reconhecidos.

Conclusões

A principal conclusão desta pesquisa foi a demarcação da unidade geofísica NW-SE condizente com a disposição espacial de mineralizações de ouro já conhecidas, sendo este padrão possível de ser cartografado por meio da interpretação de imagens SAR, gamaespectrométricas, e por modelagem preditiva. O fato mais interessante compreende a verificação de que esta unidade geofísica não associa-se a uma resposta dependente de uma única unidade litoestratigráfica (cf., mapa geológico da Figura 1), mas sim à interface do contato tectônico entre as três principais unidades portadoras de ouro nesta região: granitos Cuiú-Cuiú e Parauari, e vulcânicas Iriri. Por sua vez, este contato tectônico refere-se à instalação da zona de cisalhamento Chico Torres (Klein et al. 2001).

Com base nestas discussões, e em virtude de estudos já realizados sob o enfoque regional da Província Mineral do Tapajós utilizando-se dados digitais multifonte (e.g., Silva 2003), recomenda-se a análise mais local de regiões auríferas, a fim do reconhecimento de alvos potenciais ainda não reconhecidos, como realizado neste artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CPRM-DIGEOP pela cessão dos dados geofísicos aéreos; e ao sr. Carlos Alberto Ribeiro de Freitas (SIPAM/CTO-BE) pela disponibilização dos dados SAR-R-99B. Thais Andressa Carrino agradece à CAPES pela bolsa de mestrado e ao Laboratório de

Geofísica Aplicada (LGA-UnB) pelo suporte técnico. Adalene Moreira Silva agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

Referência

- An P., Moon W.M., Rencz A. Application of *fuzzy set theory* to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27(1): 1-11.
- Coutinho M.G.N. (Ed.) 2008. *Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa previewal para ouro em SIG*. Rio de Janeiro: CPRM, 402p.
- 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.
- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxford, Pergamon, 398p.
- 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.
- Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1998. *Projeto aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós (Bloco I e II): relatório final do levantamento e processamento dos*

dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Volume 1. Texto técnico.

Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 1987. Projeto Médio Tapajós. Levantamento e Processamento dos Dados. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Convênio DNPM/CPRM, Relatório Final, 3 vol., texto e anexos, Rio de Janeiro, 1987.

Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, 22: 591-592.

Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(1): 61-68.

Quadros T.F.P., Koppe J.C., Strieder A.J., Costa J.F.C.L. Gamma-ray data processing and integration for Iode-Au deposits exploration. *Natural Resources Research*, 2003, 12(1): 57-65.

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.

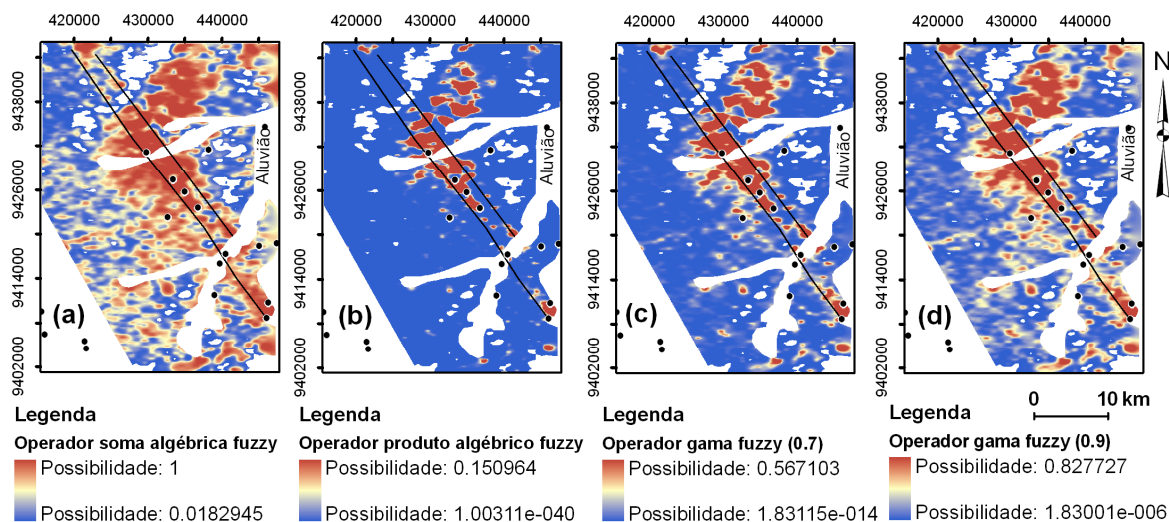


Figura 5. Resultados de modelagens de dados por meio da lógica *fuzzy*, com aplicação dos seguintes operadores: (a) soma algébrica *fuzzy*; (b) produto algébrico *fuzzy*; (c) gama *fuzzy* ($\gamma=0.7$); (d) gama *fuzzy* ($\gamma=0.9$). Os *trends* de direção aproximada N40°W, reconhecidos com base na imagem do Kd, foram sobrepostos.

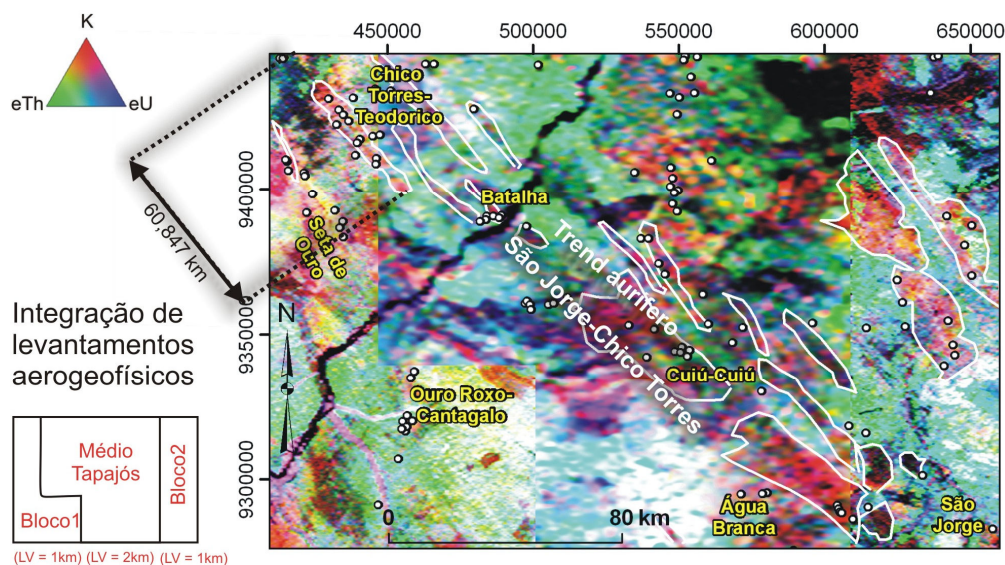


Figura 6. Imagem ternária de K, eTh, eU (RGB), com a localização de principais garimpos de ouro primário e exemplos de unidades gamaespectrométricas dispostas na direção NW-SE (*trend* aurífero São Jorge-Chico Torres segundo Coutinho et al. 2008). No extremo noroeste, onde insere-se a área de estudo deste artigo, observa-se a continuidade da unidade de alto K no aerolevantamento Médio Tapajós.