



O papel da aerogamaespectrometria, da aeromagnetometria e do sensoriamento remoto na caracterização de terrenos *greenfield* do Cráton Amazônico: resultados e desafios na discriminação de alvos exploratórios na Província Mineral do Tapajós

Thais Andressa Carrino, LGA-UnB; Adalene Moreira Silva, LGA-UnB; Nilson Francisquini Botelho, IG-UnB; Marcelo Pinto, Mapex Mineração; Luiz Carlos Pinheiro Clerot, Mapex Mineração; Alexandre Augusto Cardoso da Silva (CENPES/PETROBRAS S.A.)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th 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

The investigation of greenfield terrains through the airborne geophysics dataset provides valuable information about the geologic context and, mainly, the metalogenetic understand. Almost exclusively, there are available regional (low resolution) airborne geophysical data, like gamma-ray spectrometry and magnetic data, and, in this context, some information about the geology can be interpreted. But, the use of high resolution data, like the gradiometer magnetometry, and remote sensing images increases the potential of applications for the characterization of these terrains, like the vast area of the Amazon craton. The Tapajós Mineral Province, located in the states of Amazonas and Pará (Brazil), was selected as a case study in this paper for the recognition of the potential targets for mineral exploration.

Introdução

O acervo de dados aerogeofísicos em diferentes densidades de amostragem e adquiridos desde meados da década de 70 no Brasil possui papel relevante na etapa de caracterização de terrenos arqueanos e paleoproterozóicos do Cráton Amazônico, enquadrados na categoria de terrenos do tipo *greenfield*. Ao atuarem como subsídio ao conhecimento da cartografia geológica de uma região pouco conhecida, os dados aerogeofísicos também possibilitam a determinação, por diferentes metodologias, de áreas favoráveis à prospecção, fato de importância estratégica no contexto de áreas de fronteira exploratória, como algumas porções do Cráton Amazônico.

Ressalta-se que, o emprego de tais dados indiretos é muito afetado pelas condições ambientais. Nas ambiências de clima tropical úmido ou equatorial, a presença de espessos regolitos e solos transportados requer que a interpretação de dados gamaespectrométricos seja efetuada de forma cautelosa a fim de evitar entendimentos errôneos. Concomitantemente, a aquisição de dados aerogeofísicos nos últimos anos vem se tornando mais rígida em termos do controle, correção e qualidade dos

dados registrados, evoluindo também para a diminuição do espaçamento das linhas de vôo e para uso de outras configurações de sensores, como a magnetometria gradiométrica. Todo este conjunto de mudanças permite alavancar a discriminação de feições crustais de interesse geológico.

Com o foco no setor oeste da Província Mineral do Tapajós (PMT) (Fig. 1), este artigo aborda o uso de imagens aerogeofísicas de diferentes épocas de aquisição e distintas resoluções, e imagens de radar imageador em aplicação geológica nesta importante região aurífera do país, localizada nos Estados do Amazonas e Pará, e que constitui uma importante fronteira exploratória, cuja caracterização litológica e gênese de mineralizações ainda são constantemente debatidas. Como exemplo, Coutinho et al. (2000) afirmam duas épocas mineralizadoras em 1,96 Ga e 1,88 Ga; Santos et al. (2001) propõe a idade máxima para os depósitos do tipo *intrusion related* em 1,862 Ga; Klein et al. (2002) enfatizam um evento mineralizador entre aproximadamente 1,97 e 1,95 Ga na porção sudeste da PMT (área do prospecto Patinhas).

A exploração de ouro na PMT, nos últimos cinquenta anos, foi realizada intensamente em aluviões, elúvios e colúvios por meios rudimentares em garimpos (Peregovich et al., 2008). Mais recentemente, ocorrências primárias próximas às secundárias passaram a ser mapeadas utilizando-se dados indiretos e de mapeamento geológico. Dados anteriores à crise econômica que afetou o setor mineral brasileiro no final de 2008 indicavam que cerca de 40.000 garimpeiros exerciam a função (Rodrigues et al., 2008), e aproximadamente doze companhias estavam ativas explorando a província (Peregovich et al., 2008). Já a produção total de ouro desde 1958 foi estimada em 500 toneladas (Rodrigues et al., 2008), mas pode compreender um número maior, em função da exploração não fiscalizada deste metal.

Exploração mineral no oeste do Tapajós

As imagens aerogeofísicas regionais do Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós (1998) geradas por Silva (2003), além das imagens aerogamaespectrométricas e aeromagnetométricas gradiométricas produzidas para a região dos prospectos auríferos 12 de Outubro, Rosa de Maio e Maués a partir de dados cedidos pela empresa Mapex Mineração, e das imagens de radar de abertura sintética (SAR) da plataforma aérea R99B cedidas pelo CTO-SIPAM (Belém) (banda L, polarização HH), foram

utilizadas para a caracterização e indicação de avos potenciais à exploração mineral na PMT. Para tal investigação, seis regiões foram selecionadas, conforme indicado na Fig. 1.

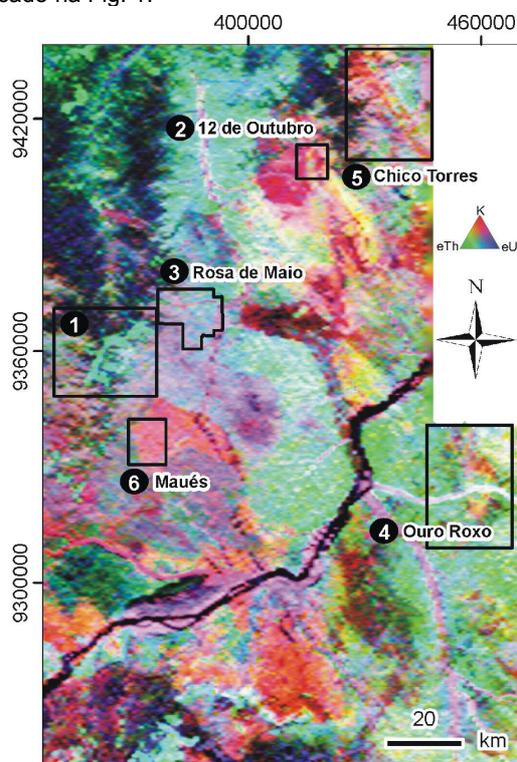


Figura 1. Imagem ternária de K, eTh e eU (aerolevanteamento Bloco 1) gerada por Silva (2003) do setor oeste da Província Mineral do Tapajós, e indicação das seis regiões analisadas com ênfase neste artigo.

Regolitos são amplamente encontrados em terrenos tropicais, particularmente entre as latitudes 35°S e 35°N (Butt et al., 2000), e os estudos dos mesmos podem contribuir efetivamente para a prospecção de depósitos minerais em regiões tropicais úmidas onde as mineralizações estão frequentemente associadas a processos de laterização. O emprego de dados aerogamaespectrométricos e altimétricos possui um papel relevante na discriminação de espessos regolitos na região Amazônica, atuando como importante guia exploratório para investigação de áreas de possível enriquecimento mineral. Medidas gamaespectrométricas de regolitos, especificamente de bauxitas provenientes de várias localidades do planeta, resultaram em teores de eTh variando entre 5 a 131 ppm (média de 49 ppm) e de eU entre 1,5 a 21 ppm (média de 11 ppm) (Isles & Rankin, 2000). Com estas informações, e usando-se o aerolevanteamento regional Bloco 1 (LV = 1 km/LC= 13km) além de imagens altimétricas do SRTM, foi possível determinar alvos potenciais de regolitos para investigação mineral na área 1 mostrada na Fig. 1, observando-se alvos com baixos valores da razão K/eU e altos da razão eTh/K. Adicionalmente, uma forma eficaz de mapear estes alvos consiste na combinação colorida das imagens da razão eTh/K, SRTM e de eTh,

respectivamente, associadas aos canais RGB. A análise deste resultado (Fig. 2) em perspectiva 2,5 D, fortalece a questão da associação de ocorrências de regolitos com maiores altitudes (áreas de platô) nesta região, em conjunto às maiores anomalias de eTh e da razão eTh/K.

A região do Prospecto 12 de Outubro (Fig. 2) caracteriza-se pela ocorrência de mineralizações auríferas relacionadas às rochas vulcânicas ácidas do Grupo Iiriri (~1,8 Ga), como riolitos, havendo associação de anomalias auríferas em solo com ocorrências de brechas hidrotermais e silicificação (*stockworks*). Na aerogamaespectrometria de alta resolução (LV=100/ LC= 2300 m), observa-se que os pits mapeados pela empresa Mapex Mineração estão associados a altos valores e K (%), eTh (ppm) e eU (ppm) (vulcânicas ácidas Iiriri), enquanto o domínio oeste desta região caracteriza-se por altos valores de K e baixos de eTh e eU relacionados com as rochas vulcânicas intermediárias da Formação Bom Jardim (~1,8 Ga) e que, por sua vez, não é marcada por anomalias de ouro em solo ≥ 50 ppb, conforme mostrado na Fig. 2 pela imagem de ouro em solo gerada pela técnica simulação indicatriz seqüencial. Com base na gamaespectrometria aérea nota-se que a presença de espesso perfil de solo ocasionou altas respostas de eTh (relacionado com a composição de minerais mais resistentes à erosão, como monazita e zircão), conforme balizado com a existência de ponto de campo (DOMAG16). Isso mostra que este método geofísico, por registrar a radiação gama que emana de poucos centímetros superficiais, deve ser interpretado com cautela em ambientes tropicais úmidos, com o da PMT. A partir das imagens dos gradientes horizontais medidos nas direções x e y (G_x e G_y), que proporcionam a melhoria na discriminação de anomalias rasas e requerem a redução da necessidade de correções regionais (Schmidt & Clark, 2006), foi possível cartografar feições de baixos gradientes relacionados com as ocorrências auríferas do Prospecto 12 de Outubro. Estas estruturas, principalmente as de direções ENE-WSW, devem representar um sistema de fraturas ou falhas rúpteis (cf., Klein et al., 2001) associado com o contexto das mineralizações de ouro. Por tal, constituem uma importante zona de influência metalogenética para a prospecção aurífera nesta região.

Com relação ao Prospecto Rosa de Maio, a observação da disposição espacial de dados pontuais de ouro em rocha (560) e da imagem da média das 500 simulações da variável indicatriz ouro em solo (gerada com 7323 amostragens), conforme mostrado na Fig. 2, revela a existência de áreas anômalas dispostas preferencialmente na direção E-W e que coincidem com lineamentos de drenagem condicionados nesta mesma direção, a exemplo do Igarapé Anta de onde se extraiu enorme quantidade de ouro secundário. Também é marcante a estruturação NW-SE, NE-SW e N-S, nas quais inclusive, alguns diques máficos estão encaixados. Estas estruturações com direções aproximadas N-S e E-W são bem marcadas ao longo do rio Parauari e refletem uma fase tectono-evolutiva mais recente (sexta fase, de acordo com o PROMIN-Tapajós – período pós-1,0 Ga) que condicionou a sedimentação mesozóica e cenozóica

(Klein et al., 2001). A respeito dos diques máficos, no Prospecto Rosa de Maio, estes são bem definidos nas imagens da amplitude do sinal analítico (ASA – Nabighian, 1972, 1974; Roest et al., 1992) gerada pelo uso de aerolevanteamento de altíssima resolução (LV=75m/LC=750 m) (Fig. 2), sendo visível a segmentação dos mesmos associada à existência de um evento tectônico pós-intrusão fissural máfica, marcado pelo domínio de falhas sinistrais. Estes diques de direção N-S, NNE-SSW e E-W não estão bem mapeadas no mapa geológico até então disponível (Klein et al., 2001), tão pouco existem dados que associem estes corpos máficos deformados a um evento tectônico específico. Essas novas interpretações abrem espaço às discussões acerca da gênese destes enxames, se **(a)** são pertencentes a uma mesma época de formação, **(b)** se possuem um papel importante na metalogênese do ouro e **(c)** se as intrusões foram favorecidas pela existência de estruturas mais antigas, algumas das quais podem ter tido papel como condutos de fluidos hidrotermais. Assim, caso estes diques possuam a idade de 510 Ma (em analogia ao dique máfico datado por Santos et al. (2002) pelo método U-Pb em badeleita numa localidade próxima ao rio Tapajós), estes podem ter tido um papel importante como fonte de calor responsável por possível remobilização do ouro, visto a intrínseca relação da disposição espacial de anomalias auríferas em solo e em rocha com a proximidade de diques máficos. Até o momento, não há evidências de campo que mostrem uma contemporaneidade de diques máficos com a formação do ouro paleoproterozóico, o que pode fortalecer a questão da idade cambriana a esta unidade.

A região do Prospecto Ouro Roxo (Fig. 3), caracteriza-se na imagem ternária (RGB) dos radioelementos normalizados de K (Kn), eTh (eThn) e eU (eUn) (gerados a partir da divisão pela somatória de $K+eTh+eU$), por altos valores de Kn, além de expressivos lineamentos NNE-SSW observados na imagem do SAR-R99B, com aproximadamente 3 a 5 km de extensão e que configuram o principal controle estrutural das mineralizações auríferas (cf., Santos et al., 2001). A zona de cisalhamento Ouro Roxo-Cantagalo (também já denominada de Centrinho – Santos et al., 2001 - e São José – Klein et al., 2001) é bem marcada na integração da imagem RGB de Kn, eThn e eU com o SAR pela disposição N-S; esta falha determina o contato tectônico a oeste desta unidade litogeofísica de alto Kn. Regionalmente, esta área do Tapajós é caracterizada por rochas graníticas do Complexo Cuiú-Cuiú (~2,0 Ga), além de granitos das suítes intrusivas Parauari (~1,8 Ga) e Maloquinha (~1,8 Ga). A unidade gamaespectrométrica caracterizada por altos valores de K normalizado e as estruturas NNE-SSW são, portanto, as mais importantes zonas de influência metalogenética reconhecidas nos dados aerogeofísicos regionais (Bloco 1 - LV=1 km/LC = 13 km) e nos dados de radar imageador em banda L (resolução espacial em azimute e alcance de 18 m) para esta região da PMT.

A região do Prospecto Chico Torres é caracterizada pela presença de *trend* estrutural de direção NW-SE conforme observado na imagem ternária em RGB de K, eTh, eU

(Fig. 3), que realça as assinaturas chaves de médio a alto K associadas com ocorrências já cartografadas pela CPRM (Klein et al., 2001) e, aparentemente, com a instalação da zona de cisalhamento dextral Chico Torres. Esta unidade litogeofísica de médio a alto K não se associa com uma resposta dependente de uma única unidade litoestratigráfica, mas sim à interface do contato entre as três principais unidades portadoras de ouro nesta região: granitos e ortogneisses do Complexo Cuiú-Cuiú, granitos da Suíte Parauari, além de rochas vulcânicas do Grupo Iriri. A análise 1D dos dados geofísicos compreendeu outro artifício usado na região da zona de cisalhamento Chico Torres, pois tal procedimento permite averiguar assinaturas com maior resolução, já que uma medida gamaespectrométrica foi realizada a cada 55 m. Como exemplo, é mostrado na Fig. 3 o perfil da linha de vôo L11050, na qual pode-se caracterizar claramente uma das ocorrências de ouro desta região nos picos anômalos da razão K/eTh , Kn e parâmetro F (Efimov, 1978). Este tipo de análise permite um melhor aproveitamento e utilização de dados aerogeofísicos regionais, caso do Bloco 1 – Província Aurífera do Tapajós para a interpretação de respostas geofísicas potenciais à exploração mineral.

No que tange a região do Prospecto Maués (Fig. 3), a partir da imagem SAR-R99B (Lhh), foi possível caracterizar estruturas NW-SE bem marcadas e relacionadas com o *trend* aurífero Patrocínio-Espírito Santo (Coutinho, 2008), e que deve estar associada com fase tectono-evolutiva de 1,99 a 1,60 Ga (Klein et al., 2001) por sua vez, bem registrada nos xistos do Grupo Jacareacanga (~2,1 Ga). A integração da imagem do K normalizado (Kn), gerada com base no aerolevanteamento marcado por LV= 400 m e LC = 4500 m, com dados de geoquímica de ouro em solo disponibilizadas pela empresa Mapex Mineração, revela que anomalias de ouro encontram-se relacionadas com os metassedimentos paleoproterozóicos caracterizados por altos valores de K, conforme observado nas ambiências da Grota do Filão, Filão do Baixão, Edse e Bibiu. Cabe ressaltar que estas anomalias auríferas localizam-se em proximidade espacial da interface granitos da Suíte Intusiva Parauari/metassedimentos Jacareacanga/diques máficos. A linha magenta tracejada mostrada na Fig. 3 demarca o domínio mineralizado que também compreende a região mais intensamente explorada pela garimpagem.

Conclusões

Este artigo apresenta uma síntese de resultados de reconhecimento de áreas chaves à exploração mineral no setor oeste da Província Mineral do Tapajós, indicando-se, em diferentes estudos de caso, as potencialidades de aplicação de dados aerogeofísicos de baixa resolução, de alta resolução, além de radar imageador para tal fim. Os principais desafios para a manipulação destes dados abrangem principalmente a baixa qualidade de conjuntos de dados aerogeofísicos, ou mesmo o registro de informações não associadas diretamente à geologia em dados de alta e baixa resolução. Neste sentido, algumas

considerações, ilustradas na Fig. 3, podem ser sintetizadas da seguinte maneira:

- as limitações de dados aerogeofísicos de baixa resolução adquiridos pela CPRM abrangem, principalmente, a pouca definição de feições crustais. Isto pode ser melhor entendido ao se comparar as imagens da amplitude do gradiente horizontal (AGHT - Graunch & Cordell, 1987) geradas com dados do Bloco-1 (derivadas horizontais calculadas) e do aerolevante magnetométrico gradiométrico Rosa de Maio (gradientes horizontais medidos) (Fig. 3). A interpretação de diques máficos e de falhas sinistrais desta região com base no dado de alta resolução (cedido pela empresa Mapex Mineração) é de fundamental importância para a caracterização geológica deste setor do Tapajós, pois tais falhas coincidem com algumas das anomalias de ouro em solo (cf., Fig. 2) e podem ter tido um papel importante para a passagem de fluidos hidrotermais. Com este exemplo, fica evidente que dados com maior densidade de amostragem e gradiométricos permitem um grande melhoramento no reconhecimento das características geológicas que podem ter importância à exploração mineral;

- por outro lado, e em função também do clima tropical úmido e do conseqüente desenvolvimento de espessos regolitos, tanto os dados gamaespectrométricos de baixa quanto os de altíssima resolução registram, muitas vezes, a obliteração das respostas de rochas *in situ* pelas assinaturas advindas de solos e aluviões, como pode ser observado na Fig. 3, na região do Prospecto Rosa de Maio. Nesta localidade, a gamaespectrometria aérea foi praticamente inutilizada para a interpretação de possível enriquecimento potássico (visto a ocorrência de K-feldspatização em granitos Parauari), em função de respostas ambíguas relacionadas com aluviões (também marcadas por alto K e altos valores de variáveis como parâmetro F, razão K/eTh etc), além da obliteração mencionada anteriormente pela ocorrência de solos (caracterizados por altos valores de eTh relacionado com minerais mais resistentes à erosão, como monazita e zircão). Para este tipo de dado geofísico, as condições ambientais da região do Cráton Amazônico devem ser levadas em consideração para uma interpretação mais cautelosa.

Agradecimentos

À UnB pelo suporte técnico, ao CNPq (projeto CT-Mineral 555063/2006-2). A.M. Silva e N.F. Botelho agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa.

Referências

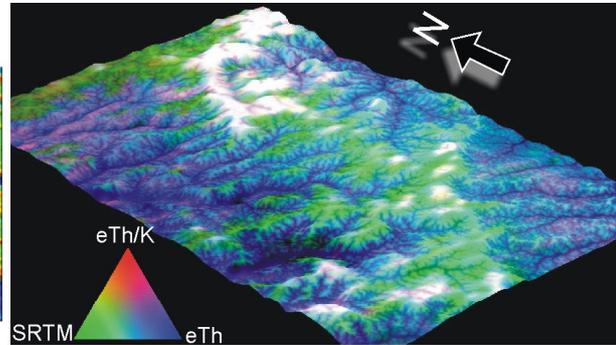
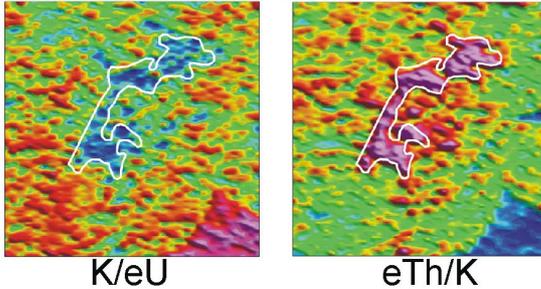
- Butt CRM, Lintern MJ, Anand RR. 2000. Evolution of regoliths and landscapes in deeply weathered terrain-implications for geochemical exploration. *Ore Geology reviews*, 16: 167-183.
- Coutinho M.G.N. (ed.) 2008. *Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa preliminar para ouro em SIG*. Rio de Janeiro, CPRM, 402p.
- Coutinho MGN, Santos JOS, Fallick AE, Lafon JM. 2000. Orogenic gold deposits in Tapajós Mineral Province, Amazon, Brazil. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, abstracts (CD-ROM).
- Efimov AV. 1978. Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, Leningrado, Naucnoproizvodstvennojc objedinenie geofizica Ed., 59-68.
- Graunch VJS & Cordell L. 1987. Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, 52: 118-121.
- Isles D & Rankin L. 2000. Geological interpretation and exploration targeting from aeromagnetic data. Apostila de Workshop. Brasília: ADIMB.
- Klein EL, Vasquez ML, Rosa-Costa LT, Carvalho JMA. 2002. Geology of Paleoproterozoic gneiss- and granitoid-hosted gold mineralization in Southern Tapajós Province, Amazonian Craton, Brazil. *Int. Geol. Review*, 44:544-558.
- Klein E.L., Almeida M.E., Vasquez M.L., Bahia R.B.C., Santos M.L.E., Ferreira A.L. 2001. 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.
- Nabighian NM. 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 NM. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section. *Geophysics*, 39: 85-92.
- Peregovich B, Mathis A & Gomes RSS. 2008. Transition from small-scale artisanal gold mining to large-scale corporate mining in the Tapajós Mineral Province, Brazil. In: XLIV Congr. Bras. Geol., 44: 2008, Curitiba. Anais...Curitiba: SBG, 2008, p. 188.
- Rodrigues J.L., Braga J.B.P., Oliveira R.A.F., Danin T. 2008. Tapajós Mineral: um novo ciclo de oportunidades e domínios. In: XLIV Congr. Bras. Geol., 44: 2008, Curitiba. Anais...Curitiba: SBG, 2008, p. 187.
- Roest WR, Verhoef J & Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57: 116-125.
- Santos J.O.S., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2002. Timing of mafic magmatism in the Tapajós Province (Brazil) and implications for the evolution of the Amazon Craton: evidence from baddeleyite and zircon U-Pb SHRIMP geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 409-429.
- Santos J.O.S., Groves D.I., Hartmann L.A., Moura M.A., McNaughton N.J. 2001. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós-Parima orogenic belt,

Amazon Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, **36**: 278-299.

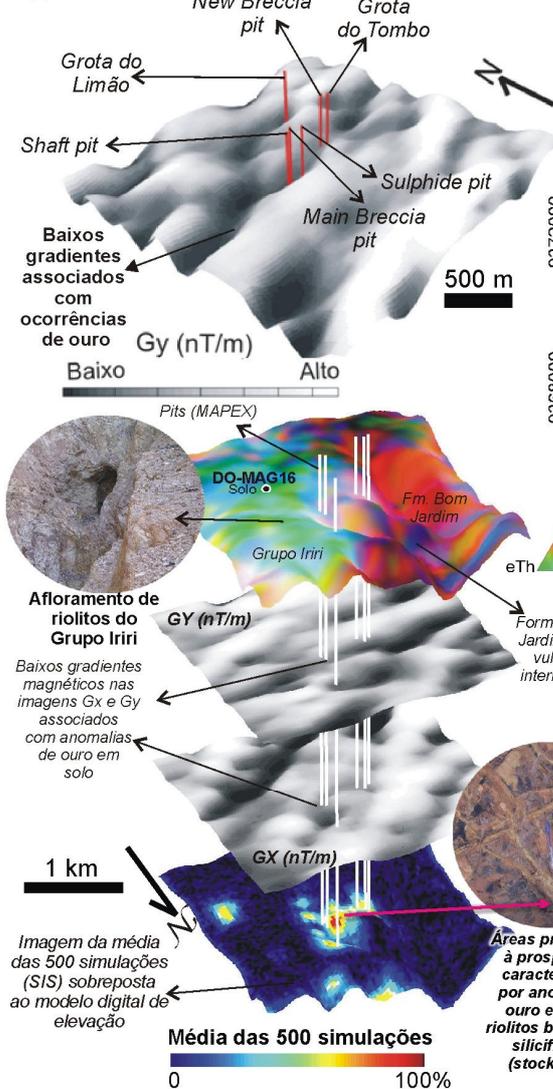
Schmidt PW & Clark DA. 2006. The magnetic gradient tensor: its properties and uses in sources characterization. *The Leading Edge*, 75-78.

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.

1 Realce de alvos para exploração de bauxita



2 PROSPECTO 12 DE OUTUBRO



Realce de alvos para a exploração de ouro

3 PROSPECTO ROSA DE MAIO

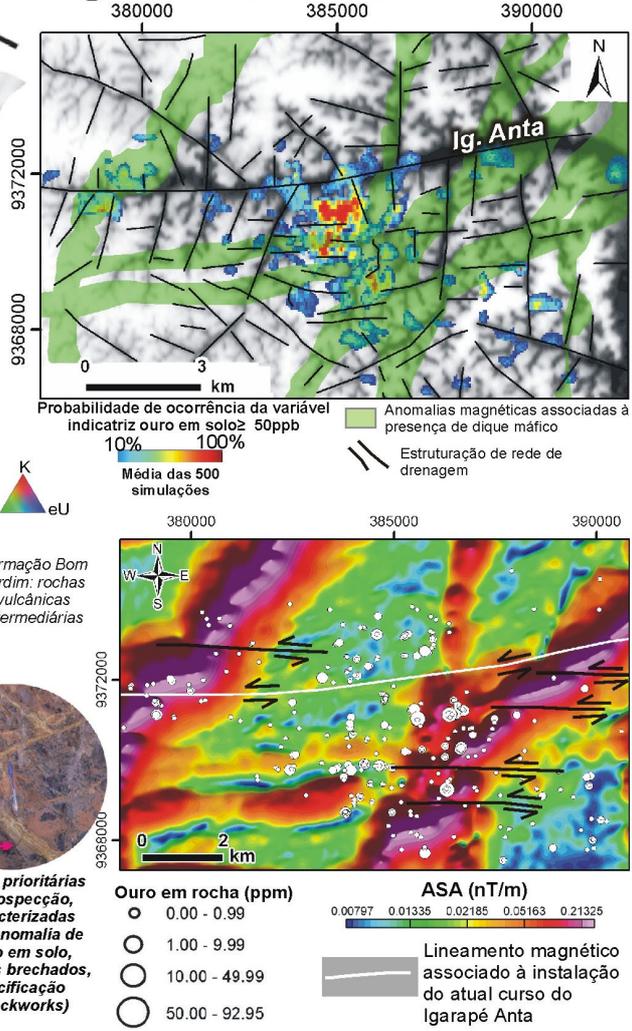
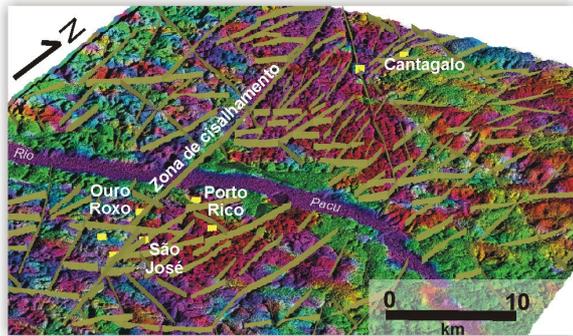


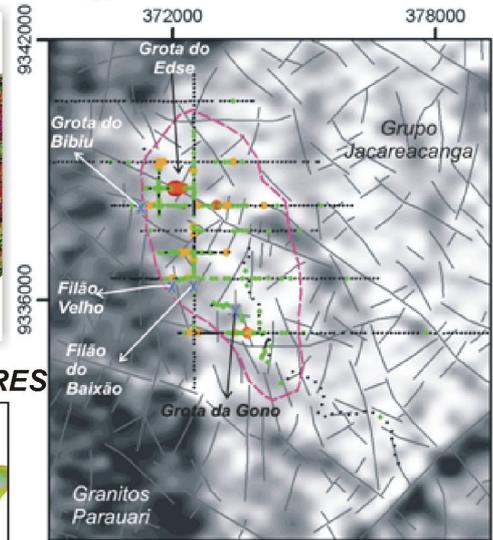
Figura 2. Indicação de alvos prospectivos associados às áreas 1, 2 e 3 da Fig. 1.

Realce de alvos para a exploração de ouro

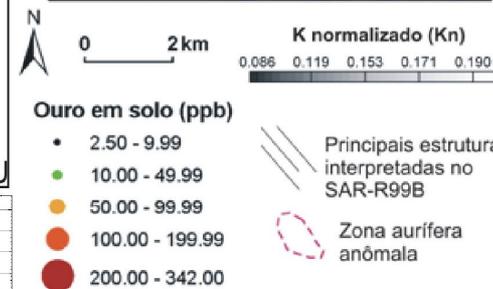
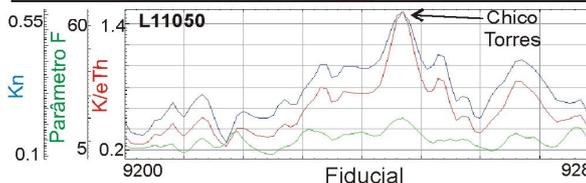
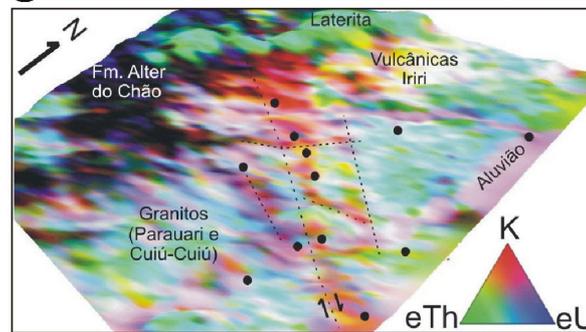
4 REGIÃO DO PROSPECTO OURO ROXO



6 PROSPECTO MAUÉS



5 REGIÃO DO PROSPECTO CHICO TORRES



Desafios na análise de dados regionais e de detalhe

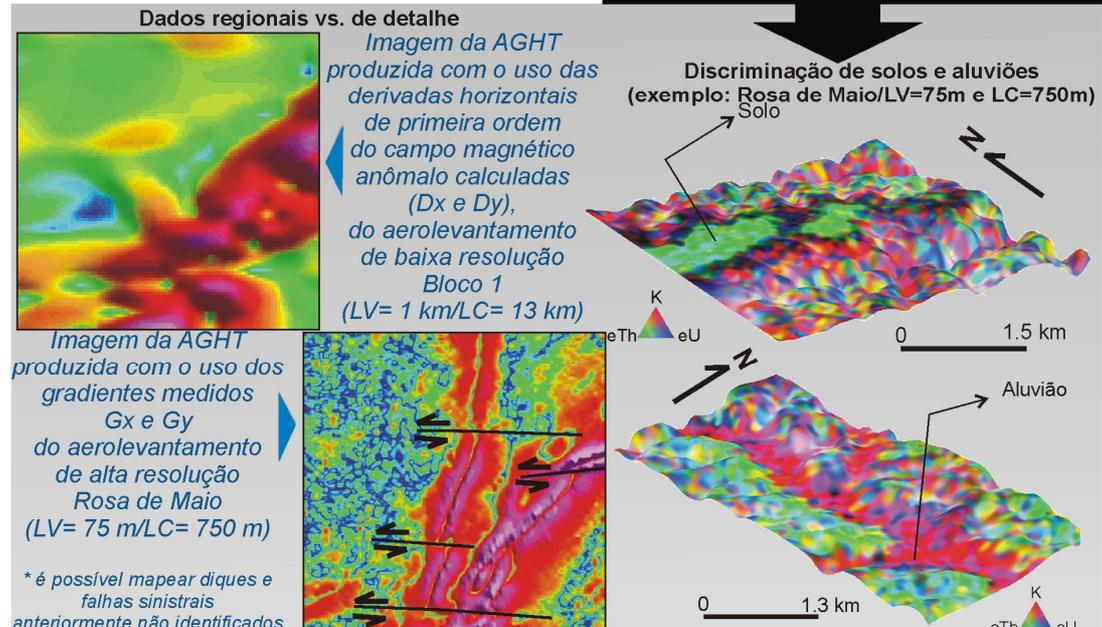


Figura 3. Indicação de alvos prospectivos associados às áreas 4, 5 e 6 da Fig. 1, e resumo de alguns desafios quanto a análise de dados aerogeofísicos regionais e de escala de detalhe.