

Análise e integração de dados do SAR-R99B com dados de sensoriamento remoto óptico e dados aerogeofísicos na região dos depósitos de óxido de Fe-Cu-Au tipo Sossego e 118, na Província Mineral de Carajás.

Emilson Pereira Leite¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹

¹ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas-SP, Brasil
{emilson, beto}@ige.unicamp.br

Abstract: L-band polarimetric SAR (Synthetic Aperture Radar) data collected through a data acquisition campaign with the R99B sensor, is now available in areas of economic and strategic importance to Brazil in the Carajás Mineral Province, due to the presence of several mineral deposits such as iron oxide-copper-gold. The campaign was designed to simulate MAPSAR data. In this work, the potentiality for geological and structural mapping contained in the SAR-R99B data in the Sossego/118 area, located in the Carajás Mineral Province, is analysed. HSV technique was applied in order to integrate SAR-R99B amplitude data with ASTER visible and near infrared imagery and with airborne geophysical data. The output images provide significant information about geological structures and lithological units associated with iron oxide-copper-gold deposits. The results may be used in spatial modeling in a GIS environment, with the aim of composing a mineral potential map of such deposits for the study area.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, carajás mineral province, synthetic aperture radar, airborne geophysics, sensoriamento remoto, processamento de imagens, província mineral de carajás, radar de abertura sintética, aerogeofísica.

1-Introdução

Os dados do sensor aerotransportado SAR-R99B, a bordo da aeronave EMB-145, foram obtidos com o objetivo principal de simular os dados SAR de resolução média (10 m) sob elevados ângulos de incidência, que serão coletados pela missão MAPSAR. Os ângulos de incidência do sinal do radar variam de 45° a 53°, sendo que a largura da faixa imageada é de 30 km. O MAPSAR está projetado para ser um pequeno sistema SAR de alta performance que irá coletar dados de alta resolução na banda L, com polarizações múltiplas (HH, HV, VH e VV). O sistema também fornecerá dados estereoscópicos e interferométricos. O MAPSAR é o resultado de esforços integrados entre o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), no Brasil, e do DLR (Agência Aeroespacial da Alemanha) e seu lançamento está previsto para 2008.

Além da simulação do MAPSAR, os dados do SAR-R99B podem fornecer contribuições científicas em áreas de importância econômica e estratégica para o Brasil. Por exemplo, nas províncias minerais de Carajás e Tapajós existe a necessidade da aquisição de dados de sensoriamento remoto de alta qualidade que sejam capazes de penetrar nas áreas florestais. Os dados do SAR-R99B é de qualidade sem precedentes em termos de resolução e razão sinal/ruído e, sendo polarimétricos, os mesmos ultrapassam os dados do RADARSAT, comumente utilizados nestas regiões, em termos de conteúdo de informação a respeito dos alvos na superfície. Isto traz uma grande motivação para o teste e desenvolvimento de métodos de processamento de dados SAR afim de aplicá-los à esses novos dados. Métodos que fazem uso de toda a informação polarimétrica tem recebido uma grande atenção na literatura recente (ver p. ex. Ferro-Famil et al., 2001; Freeman et al., 1998). O objetivo dos esforços no desenvolvimento de tais métodos é o de melhorar o entendimento dos mecanismos de espalhamento responsáveis pelas assinaturas polarimétricas dos dados SAR, o que torna mais precisa a classificação. Esses novos métodos e os já consagrados podem ser

aplicados no mapeamento da cobertura do solo, hidrologia, desastres naturais, ecologia, geologia estrutural, e mapeamento mineral (Alaska SAR FUWG, 1998).

2-Objetivos

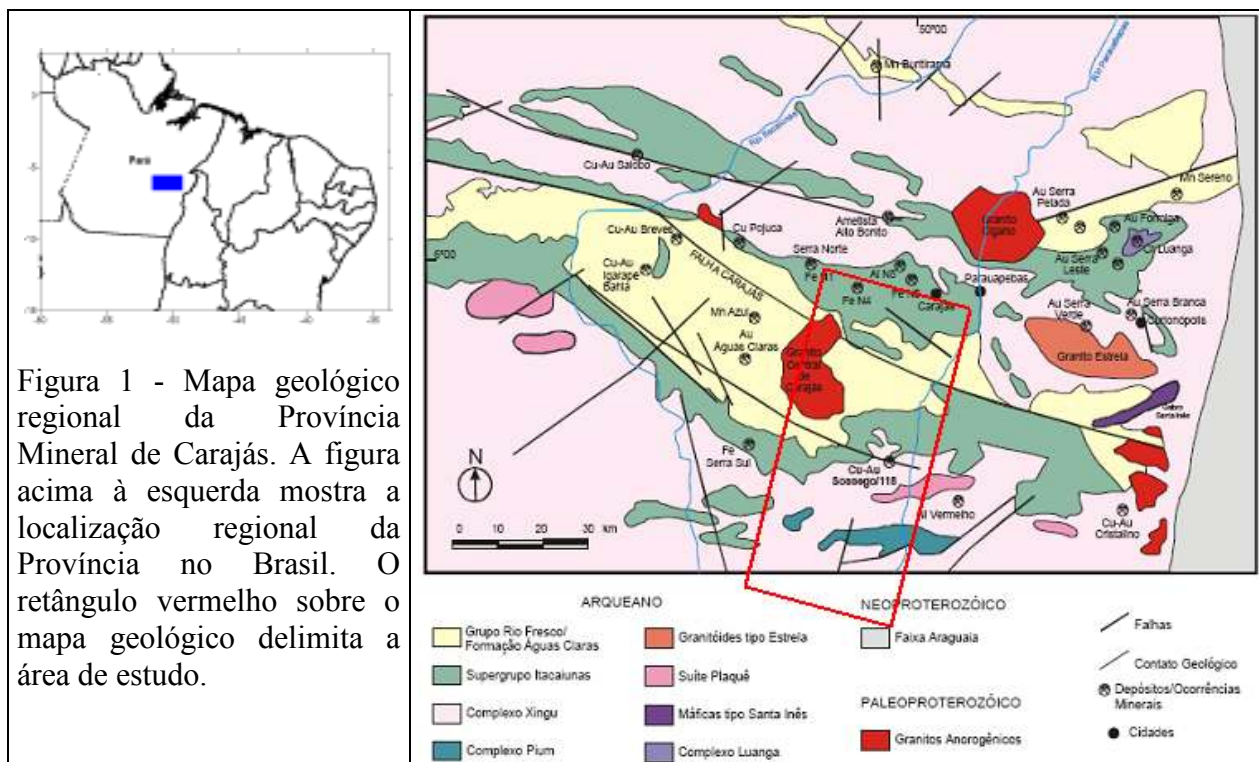
Este trabalho tem o objetivo de estabelecer e comparar modelos descritivos que incluem assinaturas geológicas, texturais, espectrais e geofísicas, às quais os depósitos de óxido de Fé-Cu-Au do cráton Amazônico podem estar associados, com ênfase naqueles que estão temporal ou espacialmente relacionados à intrusões félsicas e estruturas na porção centro-sul da Província Mineral de Carajás (PMC). Neste contexto, o trabalho pretende combinar estudos envolvendo especificamente os dados SAR do sensor R99B, dados aerogeofísicos, dados de sensores remotos ópticos e vários mapas geológicos e de distribuição mineral. O objetivo geral do processamento dos dados da simulação do MAPSAR é gerar produtos que contribuem para o mapeamento geológico e identificação de assinaturas de depósitos minerais na PMC. O processamento dos dados envolve desde filtragem para remoção de speckle, passando pela elaboração de composições em falsa-cor até a aplicação da técnica HSV para a separação de feições de longo e curto comprimento de onda nas imagens de SAR e para a integração dessas imagens com imagens provenientes de sensores ópticos como o ASTER e de dados aerogeofísicos de radiometria e magnetometria.

3 - Geologia e mineralizações na área de estudo

A PMC é parte do cinturão de Itacaiúnas, na porção leste do cráton Amazônico. A PMC pode ser vista como um modelo de faixas móveis proterozóicas localizadas ao redor do cráton Arqueano (Cordani & Brito Neves, 1982), que é constituído de complexos metamórficos de alto grau, seqüências metavulcano-sedimentares e terrenos granito-*greenstone* (Santos et al., 2001).

A área-teste de Sossego/118 está localizada na porção centro-sul da PMC, entre os paralelos 6° 5' e 6° 42' S, e os meridianos 49° 57' e 50° 22' W. A **Figura 1** mostra os limites geográficos da área. O arcabouço estrutural é o complexo Xingu, onde existem intrusões graníticas da suíte Plaqué (2.7 Ga) na porção sudeste. As rochas metavulcano-sedimentares do Super-Grupo Itacaiúnas são evidentes na região central, sendo limitadas ao norte e ao sul pelo grupo Rio-Fresco. O grupo Rio-Fresco é uma seqüência metassedimentar clástica metamorfisada em fácies xistos verdes. Os metassedimentos são metaconglomerados, metarenitos e metapelitos. Adicionalmente, alguns metassedimentos químicos podem ocorrer subordinadamente.

O depósito de óxido de Fe-Cu-Au Sossego (245 Mt de 1,1% Cu, 0,28 g/t Au) na PMC consiste de dois grupos maiores de minérios com assembléias de alteração distintas, separadas por estruturas maiores de alto ângulo. O depósito é localizado ao longo de uma zona de cisalhamento regional de direção WNW-ESE que define o contato sul entre as unidades metavulcano-sedimentares do Super-Grupo Itacaiúnas (2.76 Ga) e os gnaisses e migmatitos (2,8 Ga) do complexo Xingu. O depósito é hospedado por granitos, granitos granofíricos, gabro e rochas félsicas metavulcânicas (Monteiro et al., 2004). O depósito de 118 também é controlado por uma zona de cisalhamento de direção WNW-ESE, mas este é hospedado por rochas graníticas do Paleoproterozóico. Apesar da aparente diferença de idade, ambos os depósitos de Sossego e 118 compartilham características comuns como por exemplo alteração hidrotermal de Na e K, predominância de magnetita e calcopirita, além da associação típica de Cu-Au-Co-Ni-LREE. (Monteiro et al., 2004).



4) Metodologia

O pré-processamento dos dados do SAR-R99B foi realizado pelo CRV/SENSIPAM, em Manaus. Primeiro as imagens foram corrigidas de acordo com o padrão da antena e foram geocodificadas. A partir de 10 recortes de imagens de aproximadamente 3 km cada uma, foram gerados mosaicos para as três componentes polarimétricas (HH, HV e VV). Finalmente, foram aplicadas correções radiométricas e geométricas a fim de fazer com que os dados do SAR-R99B se aproximassem o máximo possível das características esperadas do MAPSAR. Os produtos finais deste pré-processamento foram imagens em *slant* e *ground range* para as três polarizações em banda L. O teorema da reciprocidade garante que a polarização VH resulta em retroespalhamento idêntico ao da polarização HV (Cloude & Pottier, 1997). A resolução média das imagens é de 10 m em *range* e azimute.

O processamento das imagens pode ser feito através de diferentes abordagens, dependendo da disponibilidade ou não de dados em amplitude e/ou fase e da aplicação prática dos resultados. Até agora estão disponíveis somente os dados de amplitude, portanto estes dados foram processados através de técnicas comumente aplicadas à dados de sensoriamento remoto e os resultados são promissores. Tais técnicas foram: remoção de *speckle* através de filtros MAP-gamma e Enhanced-Lee; elaboração de composições em falsa-cor (RGB), atribuindo a cada cor a imagem de uma polarização específica; integração das imagens SAR com imagens do sensor óptico ASTER, da contagem total da radiação gamma, da concentração de Th no solo e do sinal analítico do campo magnético residual.

4 - Resultados

4.1 - Composição em falsa-cor e delimitação de unidades litológicas nas imagens SAR

A **Figura 2** apresenta uma composição em falsa cor (RGB) dos canais HH, HV e VV. As imagens destes canais foram filtradas com o filtro Enhanced-Lee com janela móvel 5x5 *pixels*, no intuito de remover o *speckle* inerente às imagens de radar. Este produto foi gerado

para auxiliar na detecção e extração de informação textural e estrutural. As componentes HH e VV são mais sensíveis ao retroespalhamento *double-bounce* e de superfície rugosa, enquanto que a componente HV é mais sensível ao retroespalhamento volumétrico. Uma vez que as copas das árvores da floresta causam retroespalhamento volumétrico dos pulsos de radar, a maioria das áreas verdes na composição em falsa cor é reflexo da cobertura florestal. Áreas em lilás representam formações ferríferas da região e alguns solos expostos (áreas ocupadas). A resposta do sinal do radar na componente HV é relativamente baixa, o que resulta nas marcantes diferenças entre as faixas que foram mosaicadas.

No intuito de verificar a possibilidade da delimitação de unidades litológicas a partir das texturas das imagens SAR, a imagem da componente HH foi sobreposta às unidades litológicas conhecidas na área de estudo. A **Figura 3a** apresenta estas unidades litológicas e a **Figura 3b** apresenta as litologias à elas associadas.

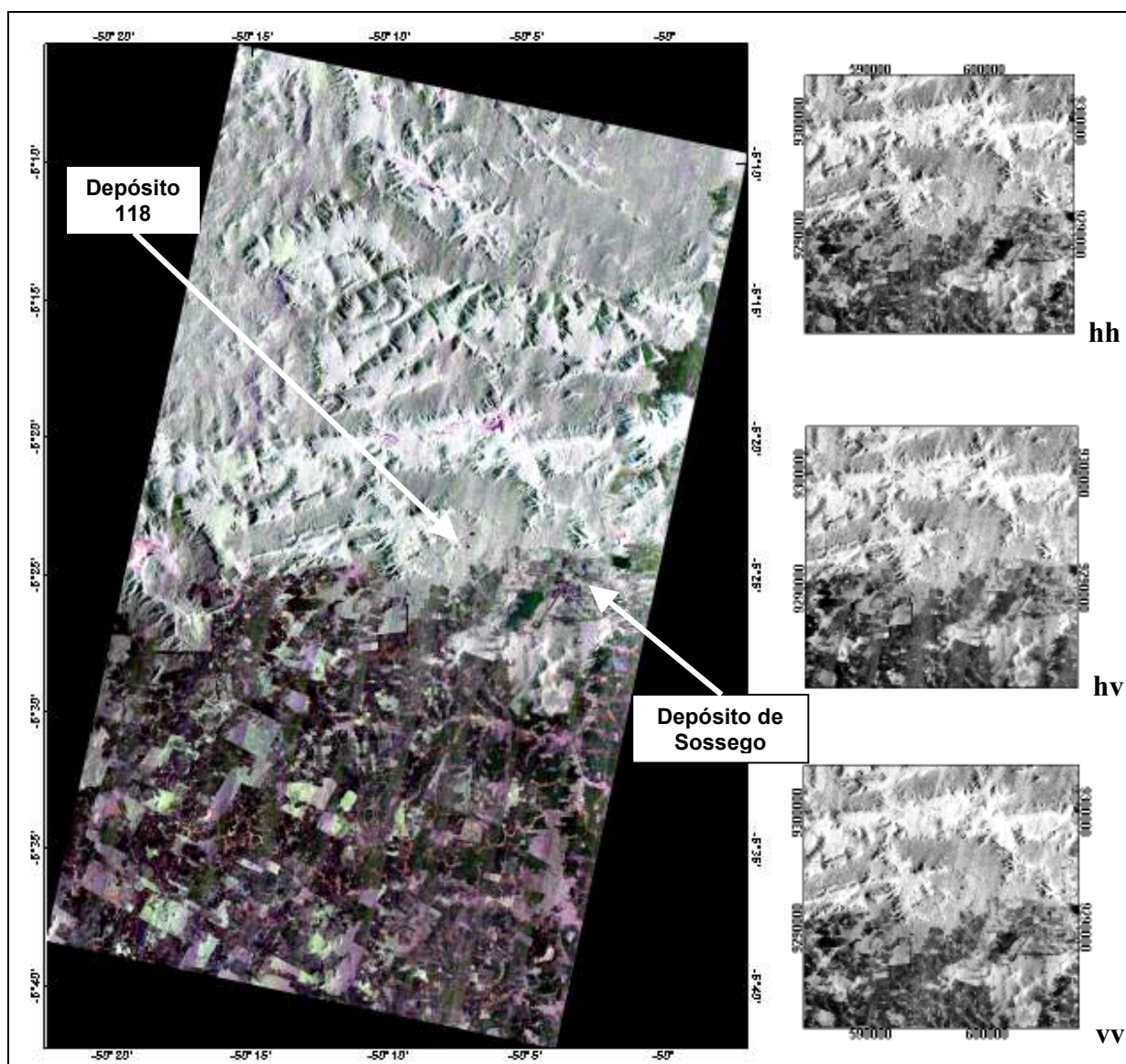


Figura 2 - Composição em falsa-cor dos canais HH, HV e VV em RGB, à qual foi aplicada ampliação de contraste linear.

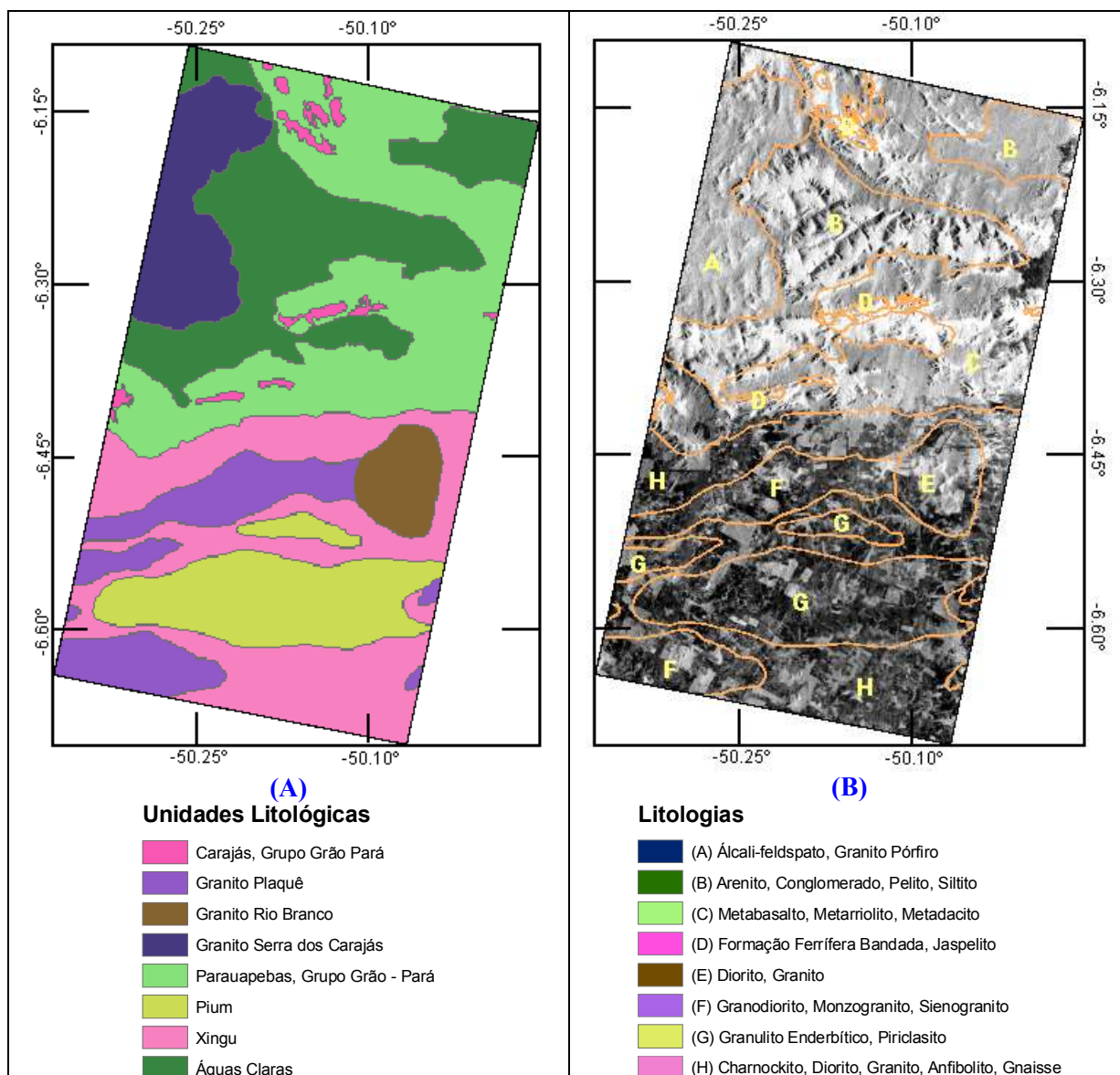
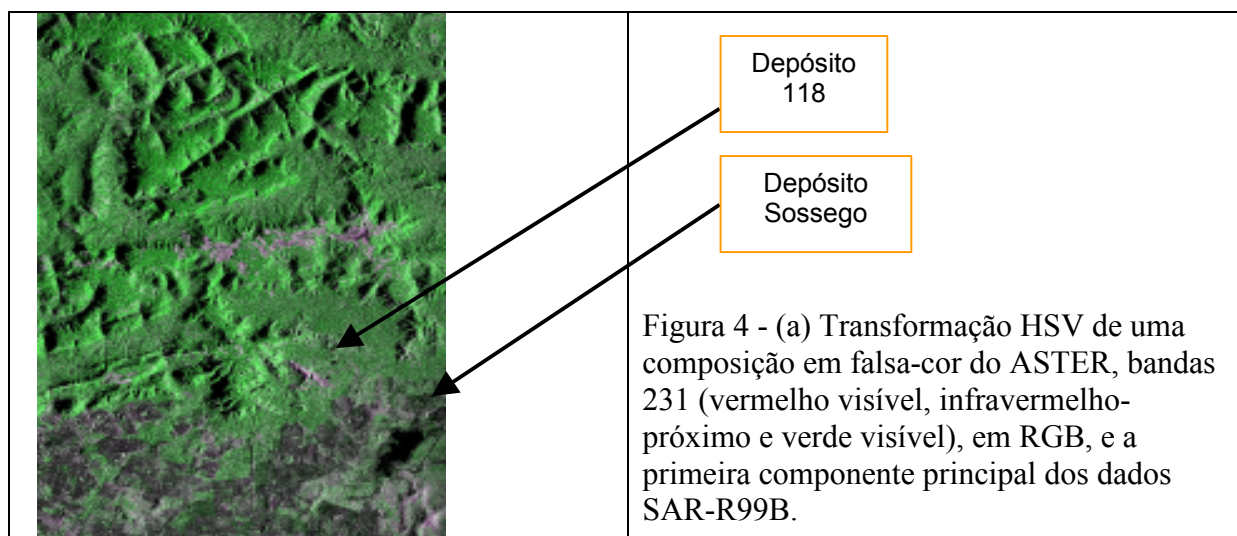


Figura 3 - (A) Mapa de unidades litológicas. (B) Limites litológicos sobrepostos à imagem do canal HH dos dados SAR-R99B.

4.2 - Integração dos dados SAR-R99B com imagens ASTER

O resultado da combinação de uma imagem adquirida pelo ASTER (Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer) com uma imagem do SAR-R99B, através da transformação HSV, é apresentada na **Figura 4**. No espaço HSV, as cores são representadas por meio de três parâmetros que correspondem a: (i) Matiz (*Hue*), que representa a cor; (iii) Saturação (*Saturation*), que corresponde à pureza das cores; e (iii) Intensidade (*Value*) que traduz o brilho. (Drury 2001). O bom desempenho desta técnica é relevado pelos seguintes atributos: (i) preservação de informações espectrais e espaciais dos dados de entrada. Por esta razão, as cores na imagem de saída refletem as informações contidas nos dados; (ii) Controle quantitativo da intensidade, matiz e saturação pelo usuário; e (iii) Possibilidade de combinação de até cinco canais de dados. (iv) Produção de grande intervalo de cores (Harris *et al.* 1990). Os valores de matiz e saturação correspondem às bandas 2 e 3 do ASTER, enquanto que o canal de intensidade foi substituído pela primeira componente dos dados de SAR.



4.3 - Integração dos dados SAR-R99B com dados aerogeofísicos

A imagem da primeira componente principal dos dados simulados do MAPSAR foi integrada aos dados radiométricos e magnéticos provenientes de levantamentos aerogeofísicos através de transformações HSV (**Figuras 5 e 6**). Os valores de matiz e saturação correspondem aos valores originais dos dados geofísicos. O canal de intensidade foi substituído pelos valores da primeira componente principal dos dados de SAR. Os valores mais baixos das grandezas geofísicas são representados pela cor violeta, enquanto que os valores mais altos pela cor azul. Os dados aerogeofísicos foram obtidos do acervo da CVRD (Companhia Vale do Rio Doce). O espaçamento entre linhas de vôo é de 2 km e entre as linhas de controle é de 14 km. A direção das linhas de vôo é NS e altura de vôo foi de 150 m.

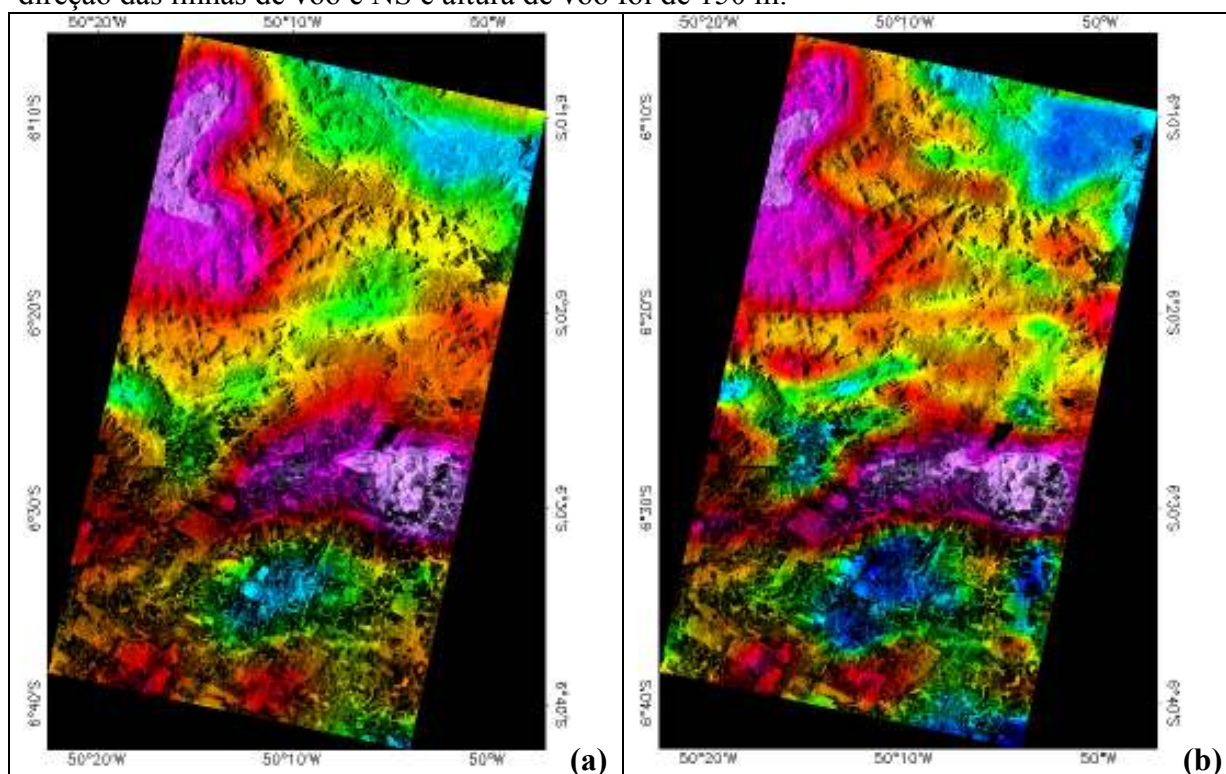


Figura 5 - Transformação HSV dos mapas radiométricos com a primeira Componente Principal dos dados SAR fixada como sendo o canal de intensidade (*Value*). (a) Contagem Total (cps). (b) Concentração de Th em ppm.

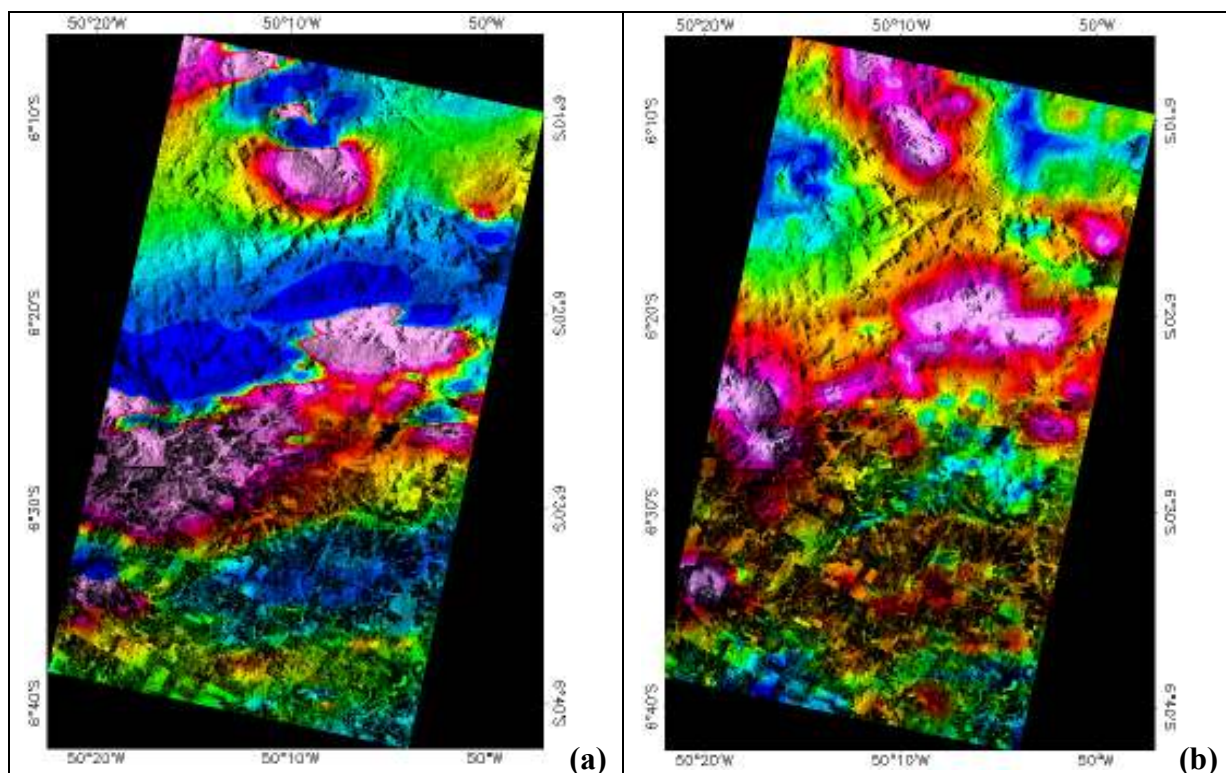


Figura 6 - Transformação HSV dos mapas derivados do campo magnético com a primeira Componente Principal dos dados SAR fixada como sendo o canal de intensidade (*Value*). (a) Campo magnético residual (nT); (b) Amplitude do Sinal Analítico (nT).

5 - Discussão dos resultados e conclusões

As tendências estruturais, algumas delas particularmente associadas a ambos os depósitos de Sossego e 118, são bem evidentes na composição em falsa-cor da **Figura 2**. Na **Figura 3**, nota-se uma correlação distinta entre as unidades litológicas mapeadas ao redor do depósito de Sossego e a informação textural expressa na imagem SAR da componente HH, por exemplo, no Granito Serra dos Carajás (Granito Central), na Formação Águas Claras e no Granito Rio Branco. A distinção das unidades geológicas da porção sul das imagens SAR é mais difícil devido à presença de áreas de intensa ocupação.

Valores altos de contagem total da radiação gama (**Figura 5a**) são relacionados ao granito central (Serra dos Carajás) e aos dioritos e granitos do Grupo Rio-Branco. Os dados SAR apresentam diferença de textura significativa entre estas unidades. Valores intermediários/altos (áreas em vermelho) podem ser atribuídos aos granodioritos, monzogranitos e sienogranitos da suíte Plaqué, bem como aos arenitos e conglomerados da formação Águas Claras na região noroeste, que aparecem mascarados devido à grande influência do Granito Central na contagem gama. Valores baixos evidenciam os granulitos do Complexo Pium e os arenitos e conglomerados da porção nordeste da Formação Águas Claras, os quais são bem definidos por uma textura lisa na imagem SAR. A concentração de Th (Tório) (**Figura 5b**) permite uma melhor definição das unidades descritas por valores baixos da contagem total. É notável também o mapeamento de formações ferríferas bandadas com valores intermediários (pequena área longilínea em tons de verde na porção central). Uma região com baixos valores de concentração de Th na porção centro-leste da imagem é onde localiza-se o depósito de óxido de Fe-Cu-Au de Sossego. À oeste deste baixo radiométrico, encontra-se uma pequena região de baixo relativo (tons de amarelo) que está associada ao depósito cupro-aurífero de 118.

Na porção central da imagem SAR integrada ao campo magnético residual (**Figura 6a**) é possível definir o contato entre as rochas da Formação Águas Claras e as rochas do Complexo Xingu. Ao sul, nota-se o limite entre a Suíte Plaquê e a Formação Pium. Na porção noroeste, existe um dipolo magnético que pode estar associado ao embasamento abaixo do contato entre algumas rochas da Formação Águas Claras e do Grupo Grão-Pará. A integração com a amplitude do sinal analítico (**Figura 6b**) permite a caracterização da Falha Carajás, bem como a identificação das variações na profundidade do embasamento magnético. Essas variações são particularmente evidentes na região do Complexo Pium.

Os resultados do processamento das imagens do SAR-R99B mostram seus potenciais benéficos, principalmente quando integrados com dados de sensoriamento remoto e aerogeofísicos, para o mapeamento geológico de unidades litológicas e tendências estruturais que controlam os depósitos de óxido de Fe-Cu-Au na PMC. As etapas futuras deste trabalho envolverão o modelamento espacial de todo o conjunto de dados multi-fonte disponível na área de estudo, através de algoritmos que fazem uso de Lógica Fuzzy e Redes Neurais Artificiais. Os resultados deverão ser inovativos e servirão de base para aplicações comerciais dos futuros dados do MAPSAR por companhias mineradoras interessadas na exploração mineral da Amazônia.

6 - Agradecimentos

O autor agradece à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro (processo: **05/04453-3**)

7 - Referências

- Alaska SAR Facility User Working Group. **The Critical Role of SAR in Earth System Science**. White Paper, Alaska SAR Facility Report, Geophysical Institute, Univ. Alaska Fairbanks, Alaska, 46 pp, 1998.
- Cloude S.R., Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. **IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing**, vol. 35, n. 1, p. 68-78, 1997.
- Cordani, U. G. ; Brito Neves, B. B.. The Geologic Evolution Of South America During the Archean And Early Proterozoic. **Revista Brasileira De Geociências**, vol. 12, n. 1-3, p. 78- 88, 1982.
- Drury S. A. **Image interpretation in geology. 3 ed.**, Inglaterra, Blackwell Science. 290 p, 2001.
- Ferro-Famil, L., Pottier, E. and Jong-Sen, L. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A Alpha - wishart classifier. **IEEE Transactions -Geoscience and Remote Sensing**, vol. 39, n. 11, p. 2332-2342, 2001.
- Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing**, vol. 36, p. 963- 973, 1998.
- Harris J. & Murray R. HIS transformation for the integration of radar imagery with geophysical data. IGARSS/ 12th Canadian Symposium on Remote Sensing. **Anais...Vancouver, BC**, 923-926, 1989.
- Machado, N., Lindenmayer, D., Lindenmayer,Z. Geocronologia U-Pb Da Província Metalogenética De Carajás, Pará: Resultados Preliminares. In: SBG/DNPM, Congresso Latino Americano De Geologia, 7, 1988, Belém, **Anais...** vol. 1, p. 339- 347.
- Monteiro LVS, Xavier RP, Carvalho ER, Souza Filho CR, Fanton JJ, Nunes AR, Morais R. O depósito de óxido de ferro-Cu-Au de Sossego, Carajás: evolução do sistema hidrotermal com base na química mineral e geotermobarometria. In: Congresso Brasileiro de Geologia, **Anais...** SBG, 42, 2004.
- Santos, J.O.S., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Moura, M.A. e Mc Naughton, N.J. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta Domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. **Mineralium Deposita**, vol. 36, p. 278-299, 2001.