

PROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS, DE RADAR E AEROGEOFÍSICAS DO BLOCO SERRA LESTE (CARAJÁS, PA) E DISCUSSÃO DO POTENCIAL PARA MINERALIZAÇÕES DE FERRO

Thais Andressa Carrino, Carlos Roberto de Souza Filho e Emilson Pereira Leite

Recebido em 15 fevereiro, 2008 / Aceito em 27 maio, 2008
Received on February 15, 2008 / Accepted on May 27, 2008

ABSTRACT. This paper applied multispectral (ETM+/Landsat 7), SAR and airborne geophysical data both to aid the geologic characterization and to highlight tracts with potential for iron deposits in the Serra Leste Block, located in the Serra dos Carajás (Pará State, Brazil). The Minimum Noise Fraction (MNF) technique was applied to six bands of the ETM+/Landsat sensor/satellite, producing the enhancement of iron-bearing surfaces. SAR data allowed the observation of the macro-topography and lineaments that were also interpreted on the basis of airborne geophysical and multispectral data. Geophysical and SAR (RADARSAT-1) data were combined by means of the IHS (intensity-hue-saturation) transform and the products yielded were used to improve the limits of the geologic units and to define targets for iron exploration. The Spectral Angle Mapper (SAM) supervised classification method was applied to a set of selected airborne geophysical images based on the rationale of the iron mineralization descriptive model and geophysical signatures observed at Serra Leste. Using documented iron occurrence as training point for the SAM classification, iron favorability maps were produced and compared against several early maps, proving to be equivalent or superior in accuracy.

Keywords: remote sensing, airborne geophysical data, Serra Leste, Carajás, iron mineralizations.

RESUMO. Este trabalho utilizou dados multiespectrais (ETM+/Landsat 7), de radar de abertura sintética (RADARSAT-1 e MAPSAR simulado) e aerogeofísicas para caracterização geológica e geração de alvos exploratórios para mineralizações de ferro no bloco Serra Leste, porção oriental da Serra de Carajás (PA). A técnica *Minimum Noise Fraction* (MNF) foi aplicada às seis bandas do sensor ETM+/Landsat 7, produzindo-se o realce de coberturas ricas em ferro. Dados SAR permitiram a observação da macrotopografia e lineamentos que foram também interpretados com base em dados aerogeofísicos e multiespectrais. As imagens geofísicas e SAR do RADARSAT-1 foram integradas por meio da técnica IHS (intensidade-matiz-saturação), e os produtos gerados foram usados para uma melhor delimitação de unidades geológicas e para definição de alvos para prospecção de ferro. O método de classificação supervisionada *Spectral Angle Mapper* (SAM) foi aplicado a um conjunto de imagens geofísicas selecionadas a partir da determinação do modelo descritivo das mineralizações de ferro e das assinaturas geofísicas verificadas no alvo Serra Leste. Utilizando-se a ocorrência documentada de ferro na região como ponto de treinamento, um mapa de favorabilidade foi produzido. Os resultados da classificação SAM mostraram-se equivalentes ou superiores quanto a sua acurácia quando comparados ao mapa geológico e produtos de realce espectral produzidos neste artigo.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, aerogeofísica, Serra Leste, Carajás, mineralizações de ferro.

INTRODUÇÃO

Clássicos processamentos de dados multiespectrais, além de interpretações qualitativas e quantitativas de imagens de radar de abertura sintética (SAR) e geofísicas estão documentados em trabalhos dirigidos à caracterização de terrenos arqueanos e proterozóicos muito intemperizados, caso da Amazônia brasileira (e.g., Paradella et al., 1994; Dias & Paradella, 1997; Pedroso, 1998; Paradella et al., 2000; Pedroso et al., 2001; Veneziani & Okida, 2001; Nunes, 2002; Morais et al., 2002; Cunha et al., 2006; Veneziani et al., 2004). Em condições de espesso manto intempérico, restritos afloramentos e densa cobertura vegetal, os diferentes dados indiretos supracitados tornam-se ferramentas indispensáveis ao reconhecimento geológico.

Este artigo avalia o emprego de dados multifonte para a caracterização da complexa trama geológica e estrutural do bloco Serra Leste, porção oriental da Serra de Carajás (Pará). Dentro deste contexto, objetiva-se a investigação de assinaturas espectrais, texturais e geofísicas com ênfase àquelas relacionadas a depósitos de ferro supergênico da região, além de discussão das vantagens e desvantagens destes diferentes dados quando aplicados a regiões marcadas por adversidades climáticas e naturais. A área de estudo, totalizando aproximadamente 695 km², localiza-se nas proximidades dos municípios de Parauapebas, Eldorado de Carajás, Canaã dos Carajás, inserindo-se na parte sul de Marabá, e, predominantemente, nos domínios de Curionópolis. A principal via de acesso é feita pela rodovia PA-150 (Fig. 1(a)).

O BLOCO SERRA LESTE

Serra Leste localiza-se no Cráton Amazônico, na subdivisão geocronológica da Província Amazônia Central (>2,5 Ga) (Tassinari, 1996) ou Carajás (3,0-2,5 Ga) (Santos et al., 2006). As principais feições estruturais compreendem a zona de cisalhamento transcorrente Cinzento (ZCTC), que apresenta sentido sinistral e a terminação 'rabo de cavalo' de Serra Pelada (*Horsetail Splay*) que consiste em uma geometria alongada na direção NE-SW, localizada na extremidade leste da ZCTC (Costa & Siqueira, 1990; Pinheiro & Holdsworth, 2000) (Fig. 1(b)). As feições estruturais foram produzidas a partir de três eventos deformacionais, como proposto em Veneziani et al. (2004).

A região consiste em um segmento da porção oriental da Serra de Carajás, denominada de bloco Serra Leste. Juntamente a este, há os blocos Serra Norte e Serra Sul que compõem uma subdivisão do Grupo Grão-Pará (Formação Carajás – formações ferríferas e jaspilitos; Formação Parauapebas – metavulcânicas, intrusões máficas e félsicas) (Veneziani et al., 2004), que, por

sua vez, pertence ao Supergrupo Itacaiúnas. Estes blocos apresentam variações de metamorfismo que mostram-se mais elevados em direção à Serra Sul (Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

A Figura 1(b) apresenta o mapa geológico simplificado do bloco Serra Leste, que, resumidamente, é caracterizado por (Dall'Agnol et al., 1994; Barros et al., 2001; Dardenne & Schobbenhaus, 2001; Villas & Santos, 2001; Nunes, 2002; Veneziani et al., 2004): embasamento gnáissico e granitóide do Complexo Xingu (>2,8 Ga); assembléias de anfibolitos, xistos, metagrauvacas, formações ferríferas, rochas máficas e ultramáficas do Grupo Rio Novo (>2,76 Ga); corpos máficos e ultramáficos como peridotitos, dunitos, leucogabros e noritos do Complexo Luanga (~2,76 Ga); quartzitos, metassilitos carbonosos, metaconglomerados e marga dolomítica da Formação Águas Claras (>2,6 Ga); granitos arqueanos (Estrela, >2,6 Ga) e anorogênicos proterozóicos (Cigano, 1,8 Ga); diques gabro-dioríticos proterozóicos; coberturas recentes (lateríticas e ferríferas).

Os principais depósitos minerais compreendem: (a) Serra Pelada, caracterizado pela ocorrência de Au-Pd-Pt de origem hidrotermal, condicionada por dobras e falhas, sendo as rochas metassedimentares da Formação Águas Claras as hospedeiras (Tallarico et al., 2000); (b) Luanga (EGP-Cr-Ni), depósito hospedado em rochas máficas e ultramáficas do complexo homônimo (Suíta, 1988; Dardenne & Schobbenhaus, 2001; Ferreira Filho et al., 2007); (c) Serra Verde (Au-Mo-Cu), cuja origem está relacionada à intrusão de rochas máficas do Grupo Rio Novo e posterior reativação tectônica associada a processos de granitogênese (Villas & Santos, 2001; Marschik et al., 2005); (d) Serra Leste, um alvo ferrífero supergênico localizado em platô e representado pelas típicas coberturas de canga que compreendem o minério laterítico, desenvolvido sobre rochas vulcânicas e formações ferríferas. A composição mineralógica dos depósitos de ferro de Carajás comumente apresenta hematita, magnetita e bandas de jaspe (Lindenmayer et al., 2001). A exploração de ouro também ocorre nos depósitos de Cotia e Formiga por meio de garimpos.

MATERIAIS

Duas imagens do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), órbita/ponto 224/64 e 223/64 de 31/07/2000 e 09/07/2001, respectivamente, foram adquiridas de modo a cobrir toda a área de estudo. Estas são caracterizadas por resolução espacial aproximada de 30 metros. O padrão de iluminação do sensor ETM+ é caracterizado por azimute e elevação solar equivalentes, respectivamente, a 49° e 43°.

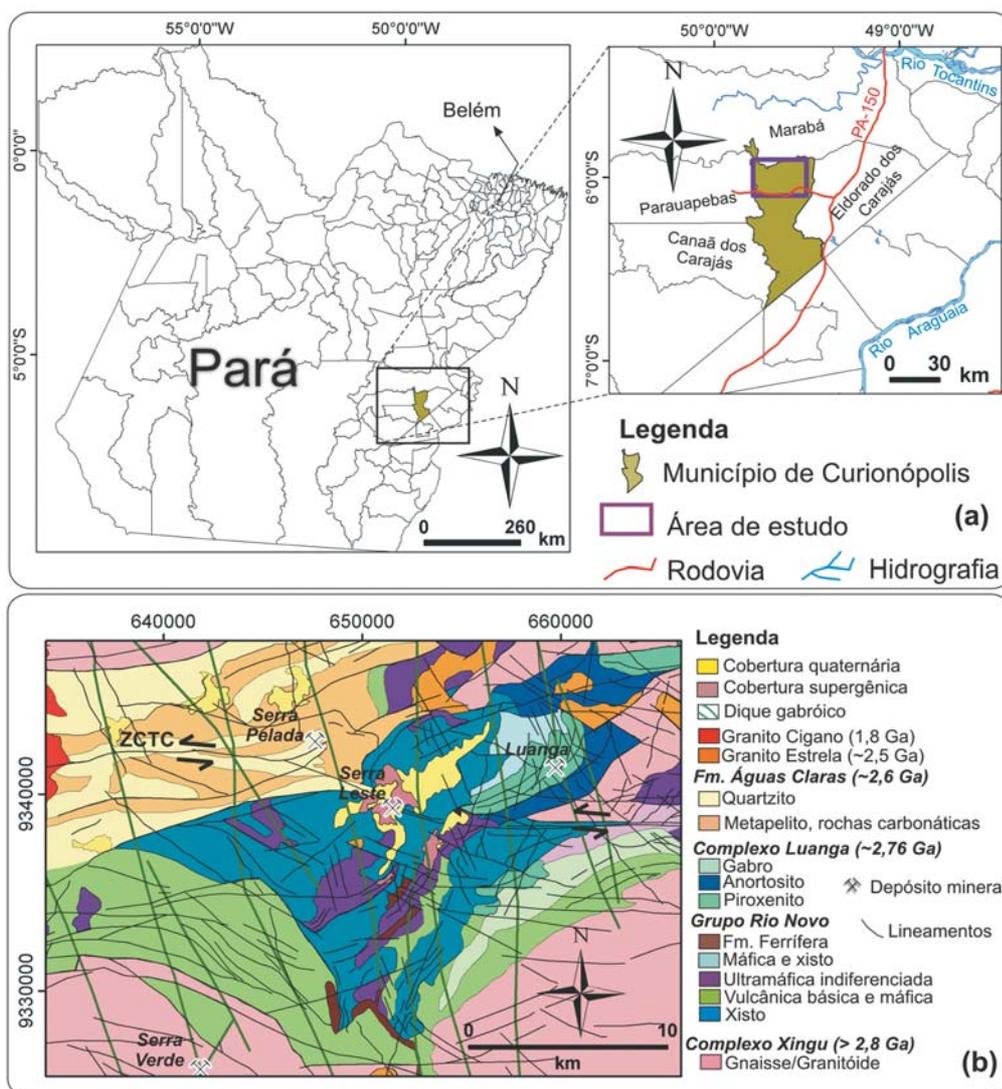


Figura 1 – (a) Localização da área de estudo no Estado do Pará; (b) mapa geológico simplificado de Nunes (2002). A zona de cisalhamento transcorrente Cinzento é representada por ZCTC.

Uma imagem de radar de abertura sintética (SAR) do RADARSAT-1, de 17/05/2000, foi adquirida no modo *Fine Resolution Path Image* F3, polarização HH, banda C (~5,6 cm), com visada descendente e ângulo de incidência de 41° a 44° (*near-far range*) e resolução nominal de 10 m. Dados simulados do MAPSAR (*Multi-Application Purpose Synthetic Aperture Radar*) incluíram o acervo de imagens de sensoriamento remoto ativo. Estes dados são decorrentes da viabilização do projeto de lançamento futuro deste sensor SAR orbital por meio de um acordo entre o INPE e a Agência Espacial Alemã. Como parte da etapa de viabilização do projeto (Fase A), a imagem utilizada foi simulada a partir dos dados do sensor SAR aerotransportado R99B,

obtidos por uma campanha da FAB, da AEB e do CENSIPAM (Paradella et al., 2006), por meio da ‘degradação’ das imagens originais adquiridas desde 2005. Os dados simulados são multi-polarizados (HH, HV, VV), adquiridos em banda L (~23,4 cm), com ângulo de incidência de 45° a 53° (*near-far range*), 10 m de resolução espacial nominal, caracterizados por largura da faixa imageada de 30 km e órbita descendente (Mura et al., 2006).

Dois aerolevantamentos, caracterizados por linhas de vôo norte-sul com espaçamento de 250 metros, foram selecionados. Os dados gamaespectrométricos são referentes ao aerolevantamento de 1993, com espaçamento das linhas de controle de 5000 metros em direção leste-oeste. O levantamento foi realizado pela

empresa Geomag por meio de um helicóptero modelo 212, e com uma altura de 120 metros fixa, cuja trajetória foi controlada por emprego de GPS (*Global Positioning System*) da Trimble, modelo TANS II. O gamaespectrômetro possui 256 canais espectrais, consistindo em quatro cristais de NaI ativado a tálio e volume de 1024 polegadas (Nunes, 2002). Os dados magnetométricos, obtidos em 1999, são marcados por linhas de controle espaçadas a 6000 metros, também em direção leste-oeste. Empregou-se um magnetômetro CS-2 de vapor de céσιο com frequência de amostragem de 10 Hz em ciclo contínuo e sensibilidade de 0,01 nT (Geoterrex, 1999).

Dados altimétricos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) adquiridos pelo ônibus espacial *Endeavour* no ano de 2000 e com resolução espacial aproximada de 90 m (Rabus et al., 2003) também foram selecionados.

ABORDAGEM METODOLÓGICA

Caracterização geológico-espectral por meio do sensor ETM+

Dados ópticos do sensor ETM+ (6 bandas do espectro eletromagnético refletido) foram previamente mosaicados de forma a cobrir toda a área de estudo. Este mosaico foi submetido a ajuste gaussiano do histograma.

Para o processamento dos dados ópticos do sensor ETM+, foi necessário minimizar os efeitos atmosféricos presentes neste tipo de imagem, visto, principalmente pelas bandas do azul e do verde visível, nas quais o processo de espalhamento atmosférico tende a ser mais intenso. A etapa de correção atmosférica foi realizada utilizando-se a técnica *subtração do pixel escuro*, cujo modelo teórico consiste em localizar em um corpo de água ou área de sombra, o pixel de menor valor (próximo a zero) e subtrair esse valor daqueles dos demais pixels da imagem. A radiância de um "pixel escuro" pode ser atribuída somente à contribuição da atmosfera, pois o valor deste pixel deveria ser zero. Desta maneira, quando se subtrai esse valor do valor de cada pixel da cena, remove-se a radiância da trajetória (Meneses & Madeira Netto, 2001).

Sob os dados corrigidos aplicou-se a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) a fim de reduzir o número de dimensões espectrais, determinando-se a dimensionalidade inerente dos dados e segregando ruídos (Kruse et al., 1993). Com este procedimento, foi possível individualizar superfícies supergênicas (ricas em ferro) pré-mapeadas (e.g., Fig. 1(b)) na imagem MNF2 (Fig. 2), abrangendo majoritariamente os domínios do depósito de Serra Leste (Fe).

Uso de imagens do RADARSAT-1 e da simulação do MAPSAR à caracterização geológica

As imagens SAR foram corrigidas por meio de 22 pontos de controle com base na identificação de feições do terreno também observadas no mosaico gerado das imagens ETM+/Landsat 7. A partir da correção geométrica, uma função polinomial de primeira ordem foi aplicada, deformando a cena a ser registrada a fim de resultar um novo conjunto de pixels para a mesma (Drury, 2001). Os valores originais dos níveis de cinza foram re-amostrados a estes pixels transformados pelo interpolador convolução cúbica. O erro quadrático médio (RMS) foi estimado em 7,8 metros e 8,15 metros respectivamente aos dados do RADARSAT-1 e da simulação do MAPSAR.

A correção radiométrica foi o segundo passo adotado, visando a redução do *speckle* (ruído), por meio de filtros adaptativos. Após a verificação dos resultados de várias filtrações, os seguintes filtros foram determinados: *gama* 5×5 pixels às imagens em três polarizações do MAPSAR simulado e o filtro Lee com janela móvel de 3×3 pixels à imagem do RADARSAT-1.

Parâmetros morfológicos e estruturais em imagens digitais ou mesmo em fotografias aéreas promovem importante direcionamento para um primeiro reconhecimento geológico de qualquer região a ser estudada. Tais parâmetros como drenagem, relevo, quebras positivas e negativas (Soares & Fiori, 1976; Santos et al., 2001), foram considerados nas abrangências do bloco Serra Leste e interpretados nas imagens de radar (Fig. 3). Drenagem e relevo representam os principais atributos para extração de informação geológica. O controle estrutural dos mesmos é indicativo de sistemas estruturais (e.g., fraturas, falhas) ou de zonas de fraqueza que limitam diferentes unidades litológicas (Soares & Fiori, 1976). Lineamentos (dúcteis e rúpteis) e alinhamentos do terreno também são passíveis de análise para definição de significado geológico atrelado.

A interpretação de lineamentos também foi realizada em maior detalhe a partir da imagem do sensor ETM+ em composição colorida falsa-cor (bandas 4, 3, 2 em RGB) e sobreposta à primeira principal componente (PC1), além das imagens SAR do RADARSAT-1 e da combinação das polarizações HH, HV, VV em RBG do MAPSAR simulado (Fig. 4). Diagramas de rose-tas azimutais (do tipo média do comprimento dos lineamentos) foram produzidos para análise dos principais grupos de lineamentos interpretados nas três imagens. A diferenciação de imageamento dos sensores ativos (SAR) e passivo (ETM+) proporcionou o realce distinto de lineamentos, como ilustrado em detalhe na Figura 5.

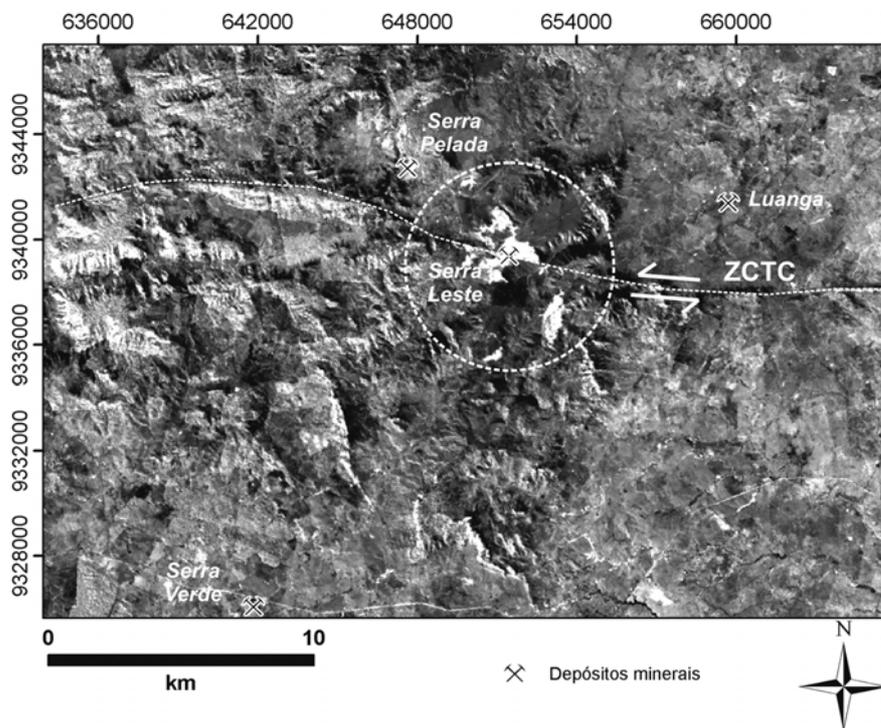


Figura 2 – Imagem MNF2, realçando coberturas supergênicas predominantemente nos domínios do depósito de Serra Leste (Fe) (círculo branco pontilhado). A linha branca pontilhada determina a zona de cisalhamento transcorrente Cinzento (ZCTC), realçada nesta imagem.

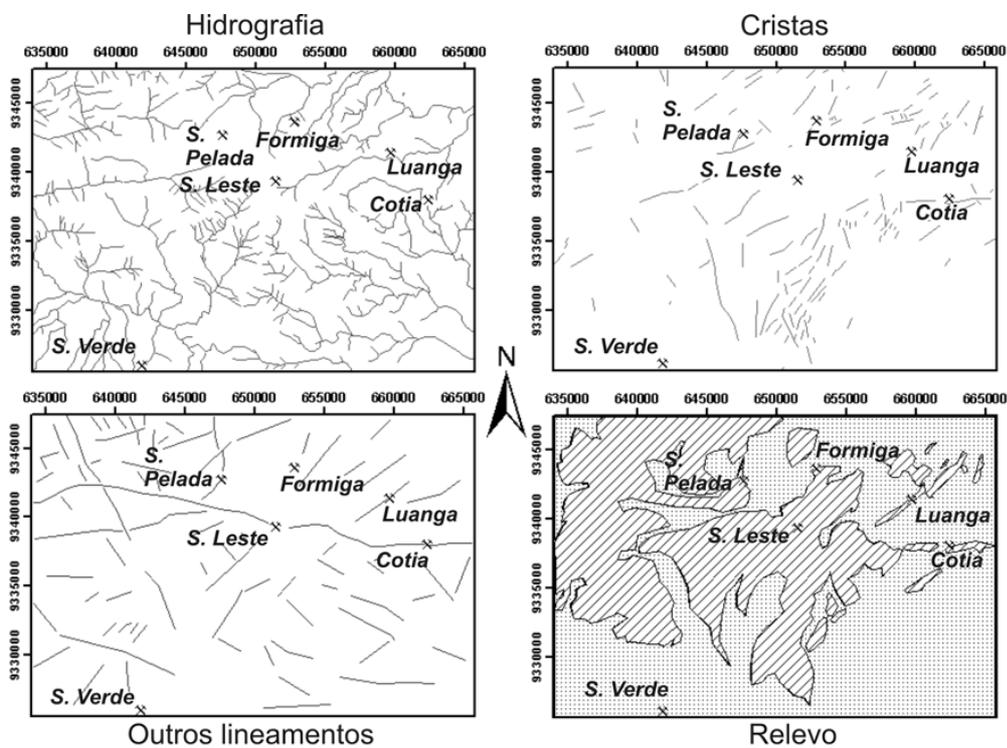


Figura 3 – Parâmetros morfológicos e estruturais interpretados na área de estudo: hidrografia, serras e cristas, lineamentos rúpteis e dúcteis (ZCTC = zona de cisalhamento transcorrente Cinzento), relevo (regiões pontilhadas indicam áreas rebaixadas; linhas diagonais representam áreas elevadas).

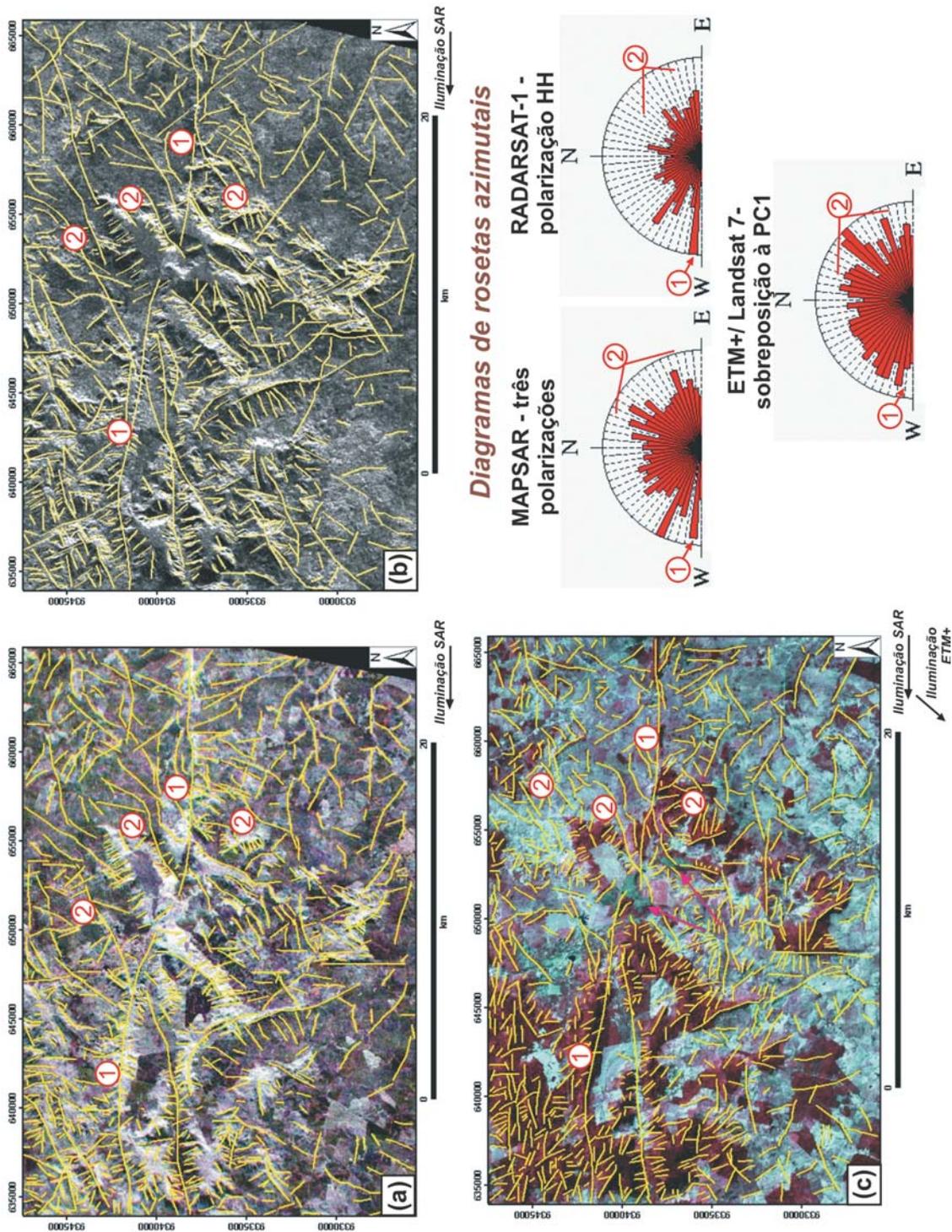


Figura 4 – Interpretação de lineamentos nas seguintes imagens de sensoriamento remoto: (a) MAPSAR simulado, em composição colorida falsa-cor HH, HV, VV (RGB); (b) RADARSAT-1 (HH); (c) imagem do sensor ETM+ em composição colorida falsa-cor 4, 3, 2 (RGB) sobreposta à PC1 (notar setas magentas indicando anomalias geobotânicas associadas à ocorrência de mineralizações ferríferas). Rosetas azimutais (do tipo média do comprimento dos lineamentos) realçam principalmente estruturas E-W (1) que caracterizam a zona de cisalhamento transcorrente Cinzento (ZCTC) e a terminação ‘rabo de cavalo’ de Serra Pelada, de direção NNE-SSW (2).

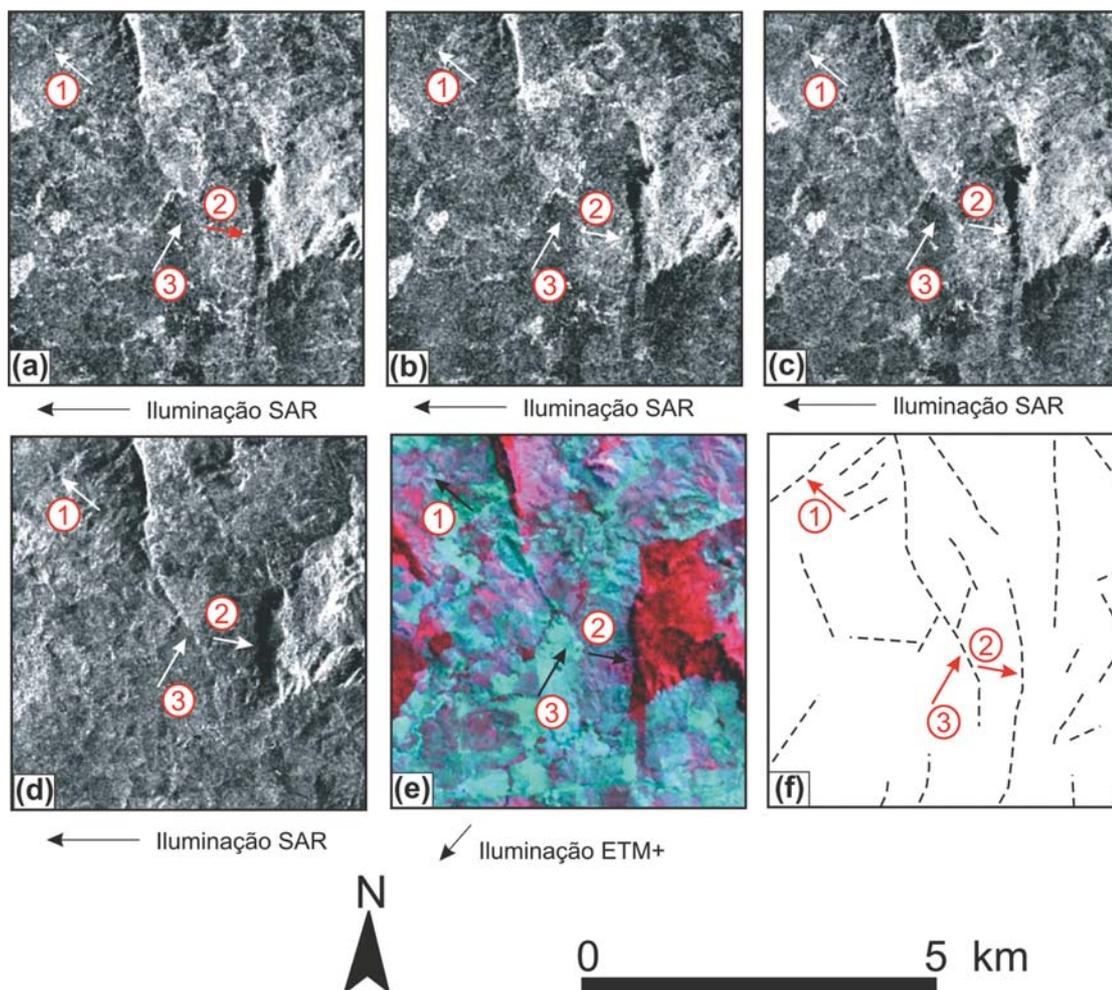


Figura 5 – Comparação de diferentes sistemas sensores na discriminação de lineamentos em uma porção da área de estudo: MAPSAR simulado nas polarizações HH (a), HV (b), VV (c), RADARSAT-1 (d), ETM+ (e), e mapa de lineamentos produzido com base em todas as imagens supracitadas (f). Os números e setas indicados nas imagens facilitam as comparações de realces distintos de lineamentos em função das diferentes geometrias de imageamento e resolução das imagens de sensoriamento remoto.

Com base nas informações estruturais e macrotopográficas observadas nas imagens SAR, um mapa de domínios texturais foi confeccionado (Fig. 6) a partir da identificação de oito classes principais descritas na Tabela 1.

Aerogeofísica

Imagens da amplitude do sinal analítico (ASA) e dos canais de K, eTh, eU e contagem total foram produzidas para caracterização geológico-geofísica do bloco Serra Leste. Para isto, os dados magnetométricos foram processados a partir da subtração do IGRF (Barton et al., 1996), posterior avaliação das linhas de vôo e testes de consistências como a diferença quarta e parâmetros P apresentados em Blum (1999) e que permitem a análise de

possíveis valores fora do desvio-padrão dos dados. Uma malha regular foi determinada para a interpolação dos dados pelo método da curvatura mínima, com espaçamento entre os pontos interpolados equivalendo a 1/4 da distância entre as linhas de vôo (Vasconcellos et al., 1994). O micronivelamento foi realizado pela metodologia descrita em Minty (1991), sendo aplicadas transformações lineares como as derivadas horizontais em x e y (DX e DY) e a derivada vertical (DZ) do campo magnético anômalo, a fim da produção da imagem da ASA (Roest et al., 1992). A ASA permite o posicionamento de corpos magnéticos já que a técnica compreende uma função simétrica em que os picos do sinal analítico encontram-se centrados nas bordas das anomalias magnéticas (Nabighian et al., 2005).

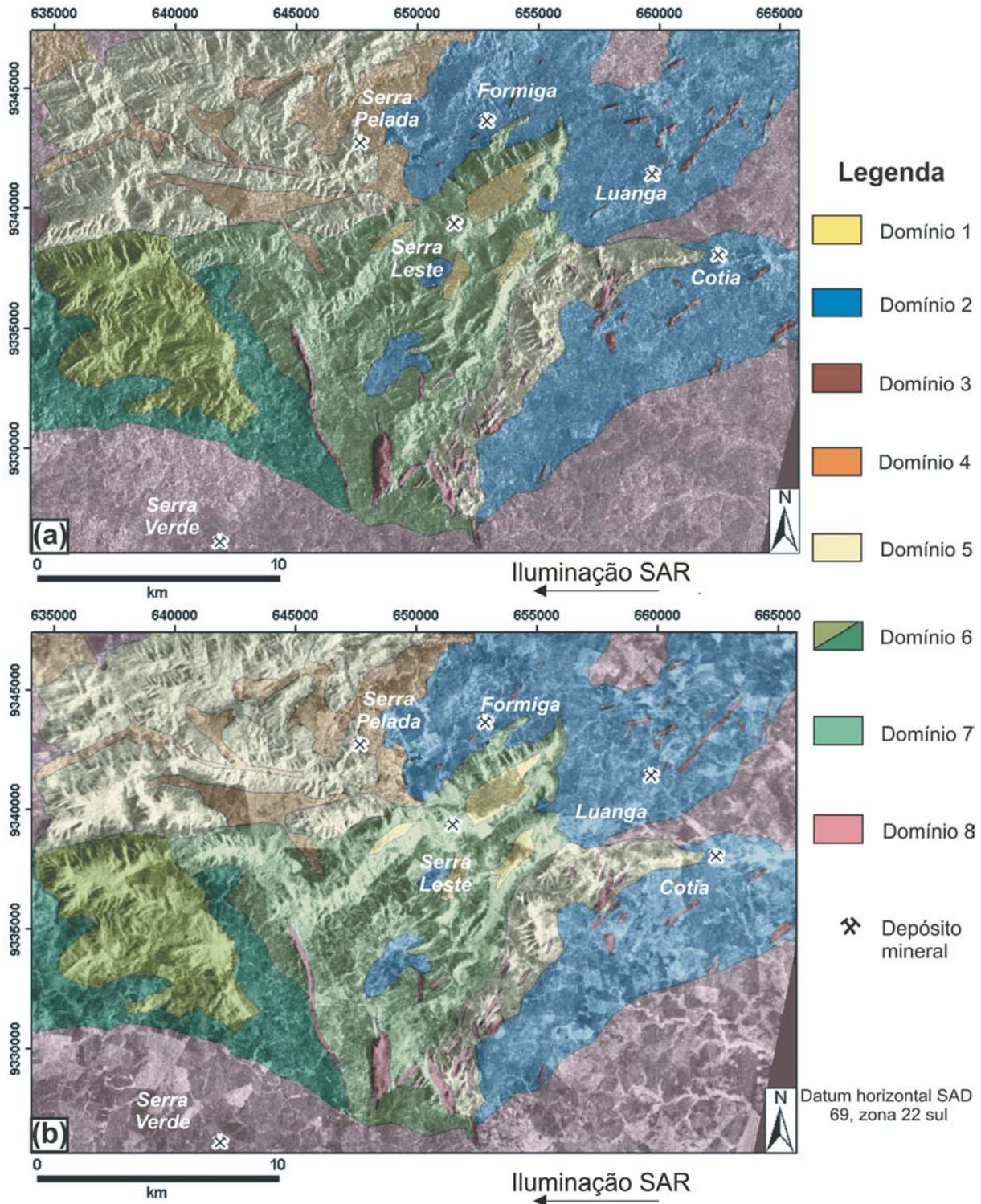


Figura 6 – Mapa de domínios texturais, com interpretação de oito classes sobrepostas à imagem SAR do RADARSAT-1 (a) e à simulada do MAPSAR (polarização HH) (b). A Tabela 1 apresenta a descrição destes domínios.

Tabela 1 – Descrição de domínios texturais interpretados a partir das imagens do RADARSAT-1 e da simulação do MAPSAR e correlações com unidades litológicas pré-mapeadas do bloco Serra Leste.

| Domínio textural | Descrição do domínio textural | Unidade litológica associada | Área (km ²) / Porcentagem |
|------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | Topos aplainados de serras. | Cobertura supergênica | 7,82 km ² / 1,13% |
| 2 | Macrotopografia aplainada (arrasada) em meio à ocorrência de pequenas elevações de orientação NNE-SSW, lineamentos que podem constituir prováveis formações ferríferas (domínio 3). A presença destas cristas associadas diferencia o domínio textural 2 do domínio 8. | Complexo máfico/ultra-máfico | 158,80 km ² / 22,85% |
| 3 | Cristas, na maioria das vezes de pequena continuidade, e com orientação NE-SW predominante. | Formação Ferrífera | 12,00 km ² / 1,73% |
| 4 | Regiões aplainadas, em contraste e próximas a serras (relevo mais abrupto). | Metapelito (<i>lato sensu</i>) | 38,26 km ² / 5,51% |
| 5 | Área serrana com drenagem encaixada. | Quartzito | 117,50 km ² /16,91% |
| 6 | Apresenta dois domínios texturais distintos: área com cristas (relevo mais serrano e dissecado), e outra com aspecto linear e suavizado, em proximidade com o domínio 7 (rochas máficas). Segundo Nunes (2002) este domínio abrange diferentes tipos de rochas vulcânicas básicas. | Vulcânica básica | 82,82 km ² / 11,91% |
| 7 | Relevo marcado principalmente por serras com destacados topos aplainados. A orientação geral das mesmas é NNE-SSW. | Máfica (sericita-clorita-talco xisto) | 108,80 km ² / 15,65% |
| 8 | Textura plana (terrenos arrasados), mas diferente do domínio 4, principalmente pela drenagem menos encaixada. São aqui inclusos os granitos tipo Estrela e granitos e tonalitos do Complexo Xingu, indiferenciáveis texturalmente. | Granito (<i>lato sensu</i>) | 169,00 km ² / 24,31% |

No caso da gamaespectrometria, foram determinados os mesmos procedimentos para o micronivelamento e determinação da malha do *grid* usados nos dados magnetométricos aéreos, produzindo-se as imagens dos canais radiométricos individuais (K, eTh, eU e contagem total).

Fusão de dados digitais pelo método IHS

O método IHS consiste em uma técnica muito utilizada para fins de integração de diferentes dados digitais em uma única imagem, explorando-se o espaço de cores da intensidade

(Intensity), matiz (Hue) e saturação (Saturation) (Harris & Murray, 1989), como já exemplificado em trabalhos aplicados à caracterização geológica (e.g., Pedroso et al., 2001; Cunha et al., 2006). Considerou-se o parâmetro I do sistema IHS como a imagem SAR referente aos dados filtrados do RADARSAT-1, variando-se a componente H que foi tomada como as imagens da ASA, do eTh, do eU e da contagem total. Cada um dos produtos integrados está visualizado na Figura 7, adicionando-se as seguintes indicações de complexos máficos e ultramáficos pré-estabelecidos por Nunes (2002): **1** – Luanga Norte; **2** –

Luanga; **3** – Luanga Sul; **4** – Afrodite; **5** – Órion; **6** – Centauro; **7** – Formiga; **8** – Pégasus. A numeração **9** apresenta áreas mais susceptíveis à ocorrência de coberturas supergênicas, pela existência já comprovada de depósito de Fe (Serra Leste) em íntima associação ao domínio geomorfológico de platôs. Na integração mostrada na Figura 7(a), lineamentos magnéticos interpretados com base na ASA estão demarcados como feições lineares ou sutilmente curvilíneas brancas.

Essas integrações proporcionam fusões de informações topográficas e texturais (radar) com medidas de variações químicas da superfície (radiometria) e de diferentes domínios magnéticos associados à subsuperfície. Ressalta-se aqui a escolha da imagem do RADARSAT-1 frente aos dados simulados do MAPSAR, uma vez que a primeira apresentou melhores características texturais devido ao ângulo de incidência usado e à banda C que proporciona uma diminuição do contraste entre solo exposto e a cobertura vegetal, uma vez que estes dois tipos de alvos apresentaram-se como rugosos neste comprimento de onda empregado. No caso da banda L (MAPSAR simulado), estes dois alvos apresentam maior contraste em função da maior incidência do comprimento de onda de $\sim 23,4$ cm, apresentando-se os solos mais lisos e a vegetação mais rugosa. Este forte contraste proporcionado pela banda L pode dificultar a interpretação geológica do terreno.

Seleção de alvos portadores de mineralizações ferríferas com base no uso de imagens geofísicas aéreas

Miethke et al. (2007) apresentam exemplos de aplicação de algoritmos de classificação supervisionada originalmente criados para o sensoriamento remoto hiperespectral a estudo de mineralizações auríferas do tipo *lode* em terrenos arqueanos/proterozóicos no sul do Cráton do São Francisco, utilizando-se imagens aerogeofísicas. Outros exemplos de aplicação destas metodologias a dados geofísicos aéreos podem ser encontrados em Carrino et al. (2007a) e Zacchi et al. (2007), que, respectivamente, realizaram o realce de alvos favoráveis a elementos do grupo da platina e de ferro.

Neste trabalho, optou-se pela utilização do algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) para geração de mapa de favorabilidade de ferro no bloco Serra Leste. De acordo com Kruse et al. (1993) e Kruse (1998), um conjunto de bandas (na idéia original, associadas ao sensoriamento remoto hiperespectral) é selecionado sendo que os pixels das mesmas são vetorizados. Assim, para cada pixel, são extraídos os valores correspondentes das

n bandas e armazenados em vetores-teste t , de tamanho $1 \times n$. Em um segundo momento, dados de referência ou *endmembers*, que no caso podem ser bibliotecas espectrais dos alvos, são escolhidos e passam por transformação vetorial, ou seja, são representados por vetores r de tamanho $1 \times n$. A comparação dos vetores *endmember(s)* e pixels das imagens ocorre por meio de um ângulo espectral (unidade de medida em radianos) e que é resultante do arco-coseno (α) do produto escalar entre os vetores t e r normalizado pelo produto de seus respectivos módulos. Aos menores valores de α há maior similaridade entre os vetores t e r , ou seja, realçam-se os pixels das imagens mais semelhantes ao(s) *endmember(s)* (Kruse et al., 1993; Kruse, 1998).

A descrição acima resume teórica e matematicamente a aplicação do SAM a imagens de sensoriamento remoto, sendo a efetividade deste algoritmo já bem confirmada em diversos estudos de caso para realce e identificação de alterações hidrotermais relacionadas a diversificados depósitos minerais (e.g., Rowan & Mars, 2003; Tangestani et al., 2005; Ducart et al., 2006). No caso da aerogeofísica, alguns ajustes da metodologia inicialmente criada são realizados para o uso do algoritmo SAM: como dados de entrada são selecionadas imagens geofísicas aéreas geradas após as etapas de processamento, enquanto o *endmember* é estabelecido por meio das respostas geofísicas provenientes do(s) pixel(s) associado(s) à(s) ocorrência(s) mineral(is) documentada(s) e georreferenciada(s).

Anterior a estas escolhas, o primeiro passo consistiu no entendimento descritivo das mineralizações de ferro do bloco Serra Leste, que como abordado anteriormente, é dependente de áreas elevadas (platôs) e é supergênico, estando associado a altos valores de eTh ou mesmo de eU, similarmente ao já observado em outras partes do mundo (Gunn et al., 1997; Dickson & Scott, 1997; Blum et al., 2001), além de baixos valores em K, remobilizado mais facilmente em circunstâncias intempéricas. Valores altos da ASA também são distinguidos, visto pela ocorrência do mineral magnetita, mesmo que em pequenas porções constituintes do depósito de ferro. Estas observações teóricas puderam ser visualizadas nas imagens geofísicas integradas da Figura 7 e, mais especificadamente, na extração quantitativa das assinaturas geofísicas do pixel (tamanho de 62,5 m) relacionado ao depósito de Fe (Serra Leste) (Fig. 8(a)). Desta maneira, as imagens de entrada selecionadas para a aplicação da técnica SAM consistiram nos canais de K, eTh, e eU interpolados e da ASA, todos convertidos a imagens com 256 níveis de cinza (8 bits), enquanto o *endmember* equivaleu à assinatura geofísica da ocorrência documentada de Fe com base nestas quatro imagens (Fig. 8(a)).

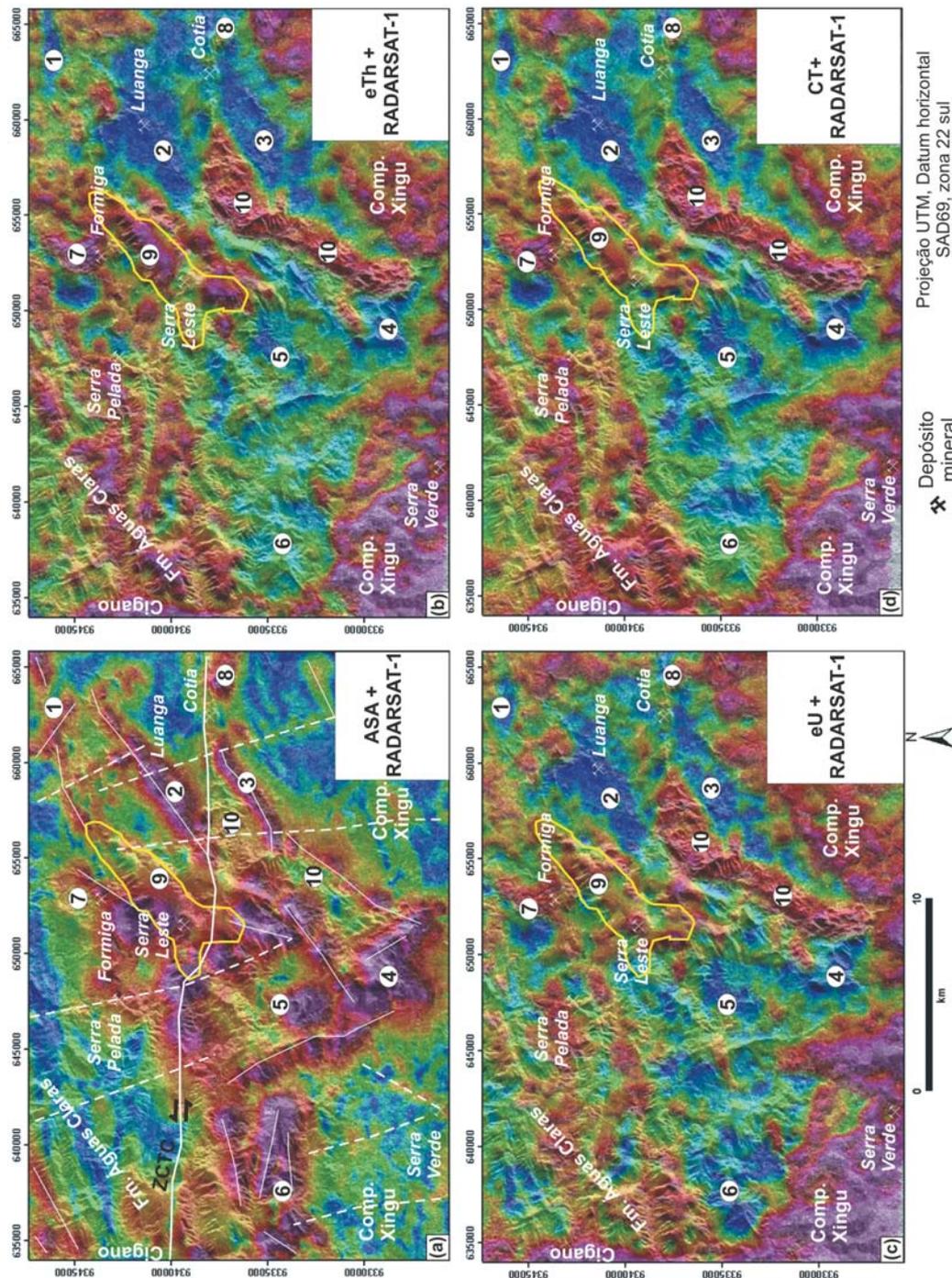


Figura 7 – Fusão, pelo método IHS, de dados SAR do RADARSAT-1 com as seguintes imagens geofísicas: (a) ASA (linhas brancas sólidas dão representatividade aos principais lineamentos magnéticos interpretados, incluindo a ZCTC; linhas brancas pontilhadas equivalem a diques gabro-dioríticos), (b) canal do eTh, (c) canal do eU, (d) canal da contagem total. Cores quentes indicam altos valores radiométricos (canais de eTh, eU e contagem total) e da ASA (nT/m). Complexos máficos e ultramáficos estão apresentados na seguinte numeração: **1** – Luanga Norte; **2** – Luanga; **3** – Luanga Sul; **4** – Afrodite; **5** – Órion; **6** – Centauro; **7** – Formiga; **8** – Pégasus (*cf.*, Nunes, 2002). Áreas susceptíveis à ocorrência de coberturas supergênicas estão indicadas em **9**. A numeração **10** apresenta um corpo geológico marcado por valores baixos a médios da ASA e altos nos canais radiométricos, fato que não condiz com a classificação do mesmo como rocha de composição máfica do Grupo Rio Novo (*cf.*, mapa geológico da Fig. 1(b)). Cigano = granito Cigano (~1,88 Ga); Comp. Xingu = Complexo Xingu (>2,8 Ga).

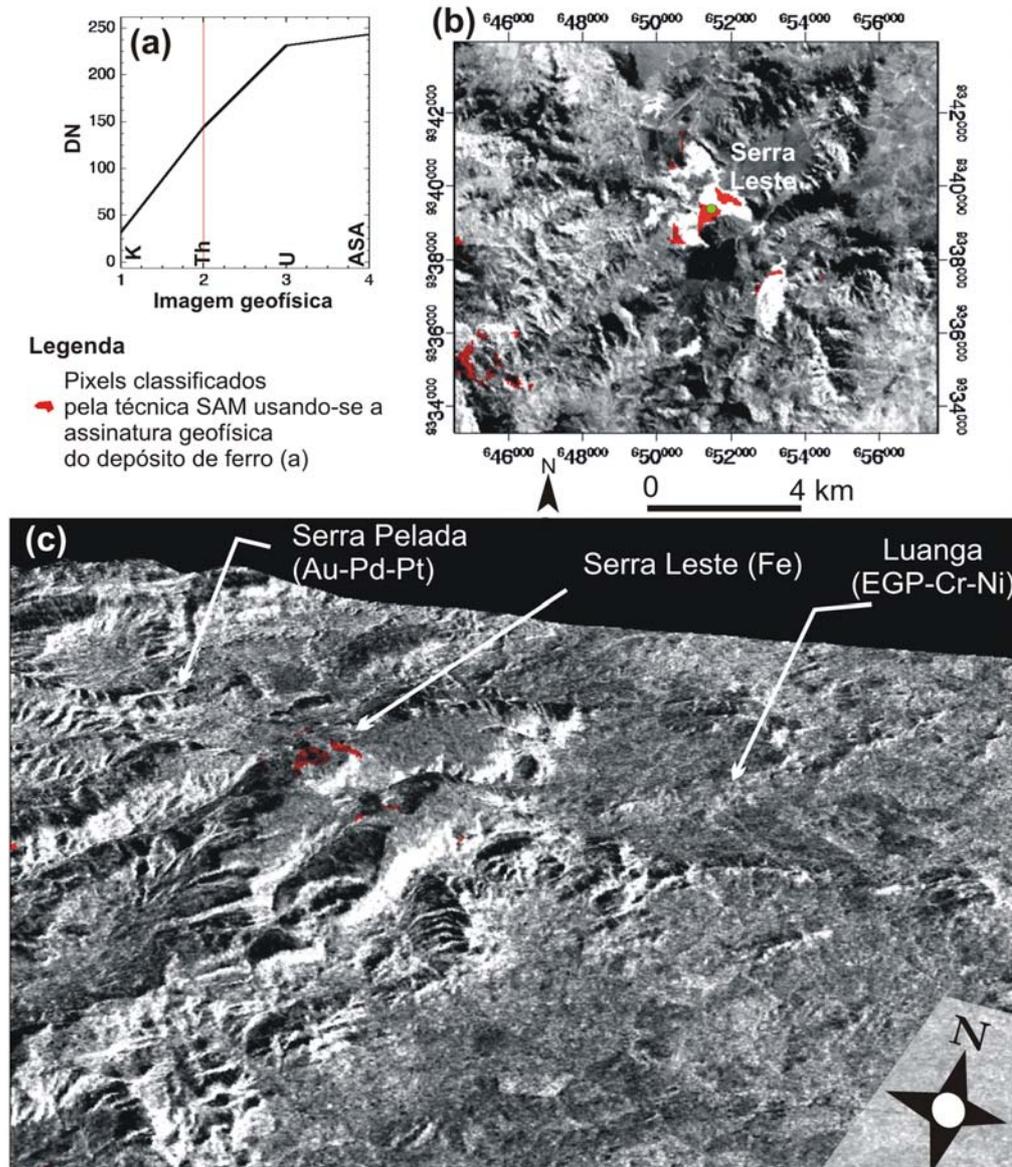


Figura 8 – (a) Assinatura geofísica do *endmember* utilizado na classificação SAM e que é representativo do pixel (62,5 m) da mineralização de Fe documentada (Serra Leste). (b) Realce de alvos potenciais de mineralizações de Fe por meio da técnica SAM sobrepostos a alvos supergênicos determinados na imagem MNF2 apresentada na Figura 2 deste artigo. (c) Resultado da classificação SAM sobreposto à imagem do RADARSAT-1 em perspectiva a partir do uso do modelo digital de elevação (SRTM).

O resultado gerado pela técnica SAM foi produzido por meio da determinação de ângulo espectral equivalente a 0,04 radianos. Este resultado foi sobreposto aos domínios das superfícies supergênicas mapeadas pela técnica MNF (*cf.*, Fig. 2) aplicada nas imagens do sensor ETM+ (Fig. 8(b)). Adicionalmente, os alvos realçados foram integrados à imagem SAR do RADARSAT-1 e ao modelo digital de elevação do SRTM. A Figura 8(c) mostra este resultado em perspectiva.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados obtidos na extração de informações espectrais

Dados multiespectrais são caracterizados por comprimentos de onda micrométricos da energia eletromagnética, fato que impede a penetrabilidade desta em ambientes marcados por densas áreas florestadas, caso da região Amazônica. No bloco Serra Leste, o

substrato nas áreas cobertas por vegetação fotossinteticamente ativa e por espessos perfis de solo não pôde ser potencialmente investigado por meio do sensoriamento remoto óptico, limitando o seu uso quanto à seleção de alvos geológicos.

Exceção ocorreu na determinação espacial de alvos supergênicos a partir da aplicação do método *Minimum Noise Fraction* (Fig. 2). Este resultado mostra excelente correlação com as superfícies laterítica e ferrífera descritas em Nunes (2002) (*cf.*, Fig. 1(b)), que por sua vez, estão atreladas à existência de anomalia geobotânica proporcionada pelo enriquecimento em ferro (estresse vegetacional) (*cf.*, notar a ausência de vegetação fotossinteticamente ativa na imagem do sensor ETM+, bandas 4, 3, 2 em RGB, indicada em setas magentas na Fig. 4). Os arredores do depósito de Serra Pelada também foram realçados, resultado justificado pela ocorrência de espesso perfil de oxidação no qual é explorado Au-Pd-Pt (Fig. 2).

Resultados produzidos com base na interpretação de dados SAR

A análise textural realizada a partir das imagens SAR do RADARSAT-1 e da simulação do MAPSAR (Fig. 6) permitiu, por extração prévia de conjuntos morfo-estruturais (Figs. 3 e 4), a caracterização de oito domínios texturais potencialmente correlatos ao arcabouço geológico do bloco Serra Leste (*cf.*, Tab. 1).

Os sensores imageadores SAR, devido ao emprego de comprimentos de onda centimétricos da energia eletromagnética podendo chegar a métricos, provêm maior gama de informações para interpretação geológica se comparados aos dados ópticos em regiões marcadas por florestas úmidas densas. Isto decorre do fato da penetrabilidade da energia microondas ultrapassar, na maioria das vezes, barreiras atmosféricas e copas de árvores, permitindo interações com troncos e até mesmo com o solo/substrato. Este contexto teórico é ilustrado nas comparações dos realces extraídos com base nos dados do sensor ETM+ (imagem MNF2 – Fig. 2) com àqueles interpretados a partir dos dados SAR (Fig. 6), revelando um maior nível de informações obtidas por meio da análise textural que da espectral.

O mapa de domínios texturais (Fig. 6), interpretado na Tabela 1, apresentou boas correlações de textura na porção noroeste da área com a Formação Águas Claras, abrangendo metapelitos e quartzitos (domínios 4 e 5), respectivamente, marcados por macrotopografia plana e serrana. A assinatura textural do depósito de Serra Pelada foi caracterizada na interface destes dois domínios e em associação às hospedeiras metapelíticas de Au-Pd-Pt (*cf.*, Tallarico et al., 2000). Outra correlação foi observada

no contexto das rochas máficas do Grupo Rio Novo associadas ao domínio 7. A macrotopografia permitiu delimitar esta unidade por meio do predomínio de áreas serranas com direção preferencial NNE-SSW. Formações ferríferas relacionadas a este grupo foram identificadas pelas salientes cristas de pequena extensão em geral e representadas pelo domínio 3. As rochas vulcânicas básicas deste grupo foram associadas ao domínio textural 6, caracterizado por macrotopografia plana e, em parte, por relevo dissecado e abrupto, distinguido do domínio 5 por forte estruturação linear de direção próxima a leste-oeste (Fig. 6).

Rochas máficas e ultramáficas associadas ao Complexo Luanga (domínio 2) e rochas arqueanas graníticas (domínio 8, onde localiza-se o depósito de Cu-Mo-Au de Serra Verde) não foram facilmente distinguidas umas das outras por meio dos critérios texturais (Fig. 6). Estes dois domínios foram separados em função da presença de formações ferríferas na área dos litotipos máficos e ultramáficos e lineamentos NNE-SSW destacados em meio a relevo erodido (domínio 2), além de sutil diferenciação na drenagem. Desta forma, a assinatura textural do depósito de Luanga, localizado no domínio 2, mostra-se associada a terrenos rebaixados e próximos a formações ferríferas (domínio 3) (*cf.*, Tab. 1).

Uma generalização foi proposta ao domínio textural 1 (Fig. 6), caracterizado como região propícia à ocorrência de superfícies supergênicas em associação à existência de platôs, morfologias que favorecem maior atuação intempérica.

Resultados da extração de lineamentos e caracterização estrutural

Um conjunto de informações de caráter estrutural do bloco Serra Leste pôde ser observado a partir de imagens de sensoriamento remoto passivo e ativo, além da aerogeofísica. Estas informações são tratadas abaixo:

- (1) dados de sensoriamento remoto são passíveis de identificação de lineamentos dúcteis, dúcteis-rúpteis e rúpteis, diferentemente de dados magnetométricos que tendem a realçar estruturas desde que estas possuam caráter magnético. Desta maneira, os dados dos sensores SAR e ETM+ puderam revelar uma trama estrutural mais densa (principalmente de lineamentos de caráter rúptil; Figs. 3 e 4) que a ASA (Fig. 7(a)).
- (2) os resultados obtidos pela interpretação de lineamentos nas imagens SAR do RADARSAT-1 e da simulação do MAPSAR (Fig. 4) demarcam eficientemente a zona de cisalhamento transcorrente Cinzento (ZCTC) caracterizada por

trend contínuo E-W, estruturas de menor extensão com direção NNE-SSW associadas à terminação 'rabo de cavalo' de Serra Pelada, além de outras estruturas de direção NNW-SSE. As rosetas azimutais ilustram melhor estas direções preferenciais (Fig. 4). Similarmente, as estruturas interpretadas na imagem do sensor ETM+, sobreposta à primeira componente principal (PC1), realçam os padrões estruturais acima mencionados, destacando-se, preferencialmente, os lineamentos de direção NNE-SSW, além da ZCTC. Esta zona de cisalhamento também foi bem delimitada na imagem MNF2 (Fig. 2).

- (3) A imagem da ASA revelou dois corpos sigmoidais dextrais relacionados ao complexo máfico/ultramáfico Luanga e referidos pelos números 2 (corpo Luanga) e 3 (corpo Luanga Sul) na Fig. 7(a). Estes mesmos corpos apresentam, um em relação ao outro, movimentação sinistral e que retrata a instalação da ZCTC (*cf.*, Nunes, 2002). Ressalta-se que estas cinemáticas dos corpos máficos e ultramáficos não foram visualizadas nas imagens de sensoriamento remoto, assim como diques discretizados e dispostos preferencialmente na direção NNW-SSE (linhas pontilhadas brancas na Fig. 7(a)).

Resultados da aerogeofísica e sua integração com dados SAR do RADARSAT-1

Os resultados obtidos com a integração dos dados SAR do RADARSAT-1 com a aerogeofísica pelo método IHS evidenciam correlações entre dados macrotopográficos e limites de corpos geológicos da área caracterizados por meio da magnetometria e gamaespectrometria.

A fusão da imagem da ASA com a imagem SAR do RADARSAT-1 (Fig. 7(a)) proporcionou a reunião das altas respostas da amplitude do sinal analítico com o domínio textural associado aos litotipos máficos e ultramáficos, dado pela caracterização de terrenos rebaixados em comparação à topografia ao redor destas áreas (domínio textural 2 e parte do domínio 6 mostrados na Fig. 6). Os oito complexos máficos e ultramáficos (números de 1 a 8 indicados na Fig. 7) estão caracterizados por estes valores muito altos da ASA. Ressalta-se que a mesma assinatura da ASA foi verificada nos domínios do depósito de Serra Leste (Fe) associada à região de macrotopografia em grande parte dominada por platôs.

No caso da integração de dados SAR com os radiométricos, foi possível correlacionar as baixas respostas dos radioelementos eTh, eU e do canal da contagem total (respectivamente,

Fig. 7 (b, c, d)) com o domínio de macrotopografia rebaixada e arrasada que caracteriza majoritariamente a abrangência das rochas máficas e ultramáficas da região. A indicação dos complexos máficos e ultramáficos (numeração de 1 a 8) mostra esta relação. Baixos valores nos radioelementos são típicos de rochas máficas e ultramáficas (Dickson & Scott, 1997), e que, no caso de estudo, são potenciais hospedeiras das mineralizações de EGP-Cr-Ni (e.g., depósito Luanga). Também, a partir destes canais, mas principalmente observando-se as respostas provenientes da concentração de eU e do eTh, a caracterização de superfícies supergênicas mostra-se relacionada a altos valores dos mesmos. Adicionalmente, estas respostas correlacionam-se a áreas serranas marcadas por topos aplainados (indicação no número 9 da Fig. 7), morfologias estas que atuam privilegiando uma maior ação intempérica.

Baixos valores da ASA e médios a altos nos canais dos radioelementos caracterizam o domínio de rochas como granitos *lato sensu* (e.g., Cigano na porção extremo oeste; Complexo Xingu predominando na parte sul), assim como rochas metassedimentares da Formação Águas Claras, localizadas no noroeste do bloco Serra Leste (Fig. 7). A macrotopografia plana e arrasada, relacionada ao domínio de rochas graníticas *lato sensu* (domínio textural 8 da Fig. 6), e a aquela marcada por alternância entre macrotopografia plana e saliente, com drenagens incisivas e associadas à Formação Águas Claras (domínios texturais 4 e 5 da Fig. 6), permitiram, por meio da técnica IHS, diferenciar estes dois domínios não distinguíveis somente pelas imagens geofísicas utilizadas (Fig. 7). Em meio à ocorrência da Formação Águas Claras, médios valores da ASA e baixos valores nos canais radiométricos foram verificados nos arredores de Serra Pelada, tornando-se estes alvos potenciais a rochas hospedeiras de elementos do grupo da platina (e.g., Tallarico et al., 2000) encontrados nas rochas metassedimentares mineralizadas a Au-Pd-Pt.

Médios valores da ASA e altos em eTh caracterizam um pequeno corpo associado ao depósito de Serra Verde. Esta pequena assinatura geofísica é correlata à ocorrência de lentes de rochas máficas do Grupo Rio Novo, hospedeiras de Cu-Mo-Au, em meio a intrusões de granitos *lato sensu* (domínio textural 4 da Fig. 6), como observado pelo predomínio da macrotopografia plana e erodida na porção sudoeste da área (Fig. 7).

Destaca-se, entretanto, o corpo indicado com a numeração 10 na Fig. 7, e pertencente no mapa geológico da Fig. 1(b) (Nunes, 2002) a rochas máficas (sericita-clorita-talco xistos), que não caracterizam-se por assinaturas radiométricas baixas e altos valores da ASA, comportamentos estes observados nos demais domínios desta litologia máfica do Grupo Rio Novo na porção

central do bloco Serra Leste. Adicionalmente, há o predomínio de macrotopografia abrupta e encaixada (domínio 5), distinta do domínio 8, caracterizada por serras de topo aplainado e com direção preferencial NE-SW (Fig. 6). Esta discussão abre caminho a novas considerações sobre a determinação litológica desta porção da área de estudo, a partir de validações de campo posteriores.

Mais considerações a respeito de domínios geofísicos do bloco Serra Leste podem ser encontradas em Nunes (2002) e Carrino et al. (2007b).

Resultados da seleção de alvos potenciais a mineralizações de ferro

Os alvos classificados pela técnica SAM (Fig. 8) foram condizentes com áreas pré-mapeadas como superfícies supergênicas, especificadamente as ferríferas, como constatado em Nunes (2002) (cf., Fig. 1(b)), e com as áreas destacadas pela técnica MNF em aplicação a dados do sensor ETM+, mostradas na Figura 2.

A partir de dados radiométricos, foi possível verificar que os alvos classificados, predominantemente, pertencem ao domínio de altos valores no canal de eU, médio-alto em eTh e baixos em K (Figs. 7 e 8(a)). Esta observação, somada à modelagem em perspectiva (Fig. 8(c)), validou ainda mais a dependência destas mineralizações ferríferas em regiões dominadas por platôs. Pixels mapeados fora das considerações acima discutidas devem ser analisados com cautela, uma vez que podem possuir assinatura geofísica similar ao do *endmember*, porém, particularmente, não estão associados a mineralizações ferríferas.

CONCLUSÕES

O estudo aqui desenvolvido proporcionou a análise das assinaturas espectrais, texturais e geofísicas de unidades geológicas e de depósitos minerais existentes no bloco Serra Leste (e.g., Figs. 2, 6 e 7), incluindo a comparação das vantagens e desvantagens de cada sistema sensor (e.g., Fig. 5).

O estudo conseguiu discriminar as diferentes respostas e realces de dados provenientes de informações indiretas (sensores), bem como dar subsídios à classificação de alvos favoráveis a mineralizações de ferro. Com referência a esta etapa de seleção de alvos mineralizados potenciais, os resultados obtidos com a técnica SAM demonstram que a mesma pode ser eficientemente aplicada a dados aerogeofísicos, considerando-se inicialmente o conhecimento das características das mineralizações e das respostas que as caracterizam por meio destes dados. A comparação do realce de corpos potenciais de ferro

nas imagens do sensor ETM+ (Fig. 2) e do conjunto de imagens aerogeofísicas (Fig. 8) ilustra e exemplifica a coerência da aplicabilidade da classificação supervisionada SAM no mapeamento de alvos minerais. Adicionalmente, o uso da técnica SAM nas condições de trabalho com imagens geofísicas aéreas exclui a necessidade de pré-processamento visando a correção atmosférica, etapa indispensável a imagens de sensoriamento remoto que devam ser submetidas a qualquer tipo de classificação supervisionada.

AGRADECIMENTOS

T.A. Carrino e E.P. Leite agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão, respectivamente, da bolsa de iniciação científica (proc. n° 2006/02566-8) e da bolsa de pós-doutorado (proc. n° 2005/04453-3). C.R. Souza Filho agradece à FAPESP pelo auxílio financeiro à pesquisa (procs. n° 2003/09916-6 e n° 2002/09038-6) e ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BARROS CEM, SARDINHA AS, BARBOSA JPO, KRIMSKI R & MACAMBIRA MJB. 2001. Pb-Pb and U-Pb zircon ages of Archean syntectonic granites of the Carajás metallogenic province, northern Brazil. South American Symposium on Isotopic Geology. 3. Extended abstract volume, Pucón, Chile, 94–97.
- BARTON CE, BALDWIN RT, BARRACLOUGH DR, BUSHATI S, CHIAPPINI M, COHEN Y, COLEMAN R, HULOT G, KOTZÉ R, GOLOVKOV VP, JACKSON A, LANGEL RA, LOWES FJ, McKNIGHT DJ, MacMILLAN S, NEWITT LR, PEDDIE NW, QUINN JM & SABAKA TJ. 1996. International Geomagnetic Reference Field. 1995 Revision. IAGA Division V. Working Group 8, Phys. Earth Planet. Inter., 97: 23–26.
- BLUM MLB. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 229 pp.
- BLUM MLB, SILVA AM, JOST H, MENESES PR, FUCK RA, BROD JA, TEIXEIRA AA, SILVA AAC, SPIGOLON ALD, MAAS MVR, SOUZA MM, MACEDO JÚNIOR P, LIMA BEM & CAMPOS MO. 2001. Aplicação de dados aerogeofísicos no mapeamento geológico do limite entre os terrenos arqueanos e proterozóicos da região de Crixás-Cedrolina, Goiás. Rev. Bras. Geoc., 31(3): 279–286.
- CARRINO TA, SOUZA FILHO CR & LEITE EP. 2007a. Aplicação de técnicas de classificação espectral a dados magnetométricos e gamaespectrométricos para mapeamento de áreas favoráveis a mineralização de EG na região de Serra Leste, Província Mineral de Carajás (Pará). In: Inter-

- national Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 10.: 2007, Rio de Janeiro. Anais. . . Rio de Janeiro: SBGf, 2007, CD-ROM.
- CARRINO TA, SOUZA FILHO CR & LEITE EP. 2007b. Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, Província Mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geof.*, 25(3): 307–320.
- COSTA JBS & SIQUEIRA JB. 1990. Transtração e transpressão ao longo do Lineamento Cinzento (região da Serra dos Carajás). *Rev. Bras. Geoc.*, 20(1-4): 234–238.
- CUNHA ERSP, SANTOS AR, PARADELLA WR, BARROS CEM, VENEZIANI P & VALE AG. 2006. Integração de dados de radar, aerogamaespectrométricos e geológicos nos domínios do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geoc.*, 36(2): 327–335.
- DALL'AGNOL R, LAFON JM & MACAMBIRA MJB. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineral. Petrol.*, 50: 113–118.
- DARDENNE MA & SCHOBENHAUS C. 2001. Metalogênese do Brasil. Ed. UnB, Brasília-DF, 78–83.
- DIAS RR & PARADELLA WR. 1997. Integração de dados aéreos gamaespectrométricos com imagens TM-Landsat no mapeamento geológico da área do Pojuca, Província Mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geof.*, 15(1): 23–33.
- DICKSON BL & SCOTT KM. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 187–200.
- DRURY SA. 2001. Image interpretation in geology. Blackwell Science, London, 290 pp.
- DUCART DF, CRÓSTA AP, SOUZA FILHO CR & CONIGLIO J. 2006. Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: field mapping, short-wave Infrared spectroscopy, and ASTER images. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 101: 981–996.
- FERREIRA FILHO CF, CANÇADO F, CORREA C, MACAMBIRA EMB, SIEPIERSKI L & JUNQUEIRA-BROD TC. 2007. Mineralizações estratiformes de EGP-Ni associadas a complexos acamadados em Carajás: os exemplos de Luanga e Serra da Onça. In: ROSA-COSTA LT, KLEIN EL & VIGLIO EP. (Org.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*, Belém-PA, Publitec Gráfica & Editora, 5: 1–14.
- GEOTERREX, 1999. Digital archive description. Aerolevantamento do Bloco Serra Leste. Relatório. 67 pp.
- GUNN PJ, MAIDMENT D & MILLIGAN PR. 1997. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 175–185.
- HARRIS J & MURRAY R. 1989. HIS transformation for the integration of radar imagery with geophysical data. In: IGARSS/ 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, 12.: 1989, Vancouver. Proceedings. . . Vancouver: IGARSS, 1989, p. 923–926.
- KRUSE FA. 1998. Advances in hyperspectral remote sensing for geologic mapping and exploration. In: 12th JPL Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory Publication, 12.: 1998, Proceedings. . . JPL, p. 149–156.
- KRUSE FA, LEFKOFF AB, BOARDMAN JB, HEIDEBRECHT KB, SHAPIRO AT, BARLOON PJ & GOETZ AFH. 1993. The Spectral Image Processing Systems (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 44: 145–163.
- LINDENMAYER ZG, LAUX JH & TEIXEIRA JBG. 2001. Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geoc.*, 31(1): 21–28.
- MARSHCHIK R, MATHUR R, RUIZ J, LEVILLE R & ALMEIDA AJ. 2005. Late Archean Cu-Au-Mo mineralization at Gameleira and Serra Verde, Carajás Mineral Province, Brazil: constraints from Re-Os molybdenite ages. *Mineralium Deposita*, 39: 983–991.
- MENESES PR & MADEIRA NETTO JS. 2001. Sensoriamento remoto: refletância dos alvos naturais. 1.ed., editora UnB, Brasília-DF, 262 pp.
- MIETHKE C, SOUZA FILHO CR & SILVA AM. 2007. Assinatura geofísica e modelos prospectivos 'knowledge-driven' de mineralizações de Au no lineamento Congonhas, sul do Cráton São Francisco, MG. *Rev. Bras. Geoc.*, 37(3): 490–503.
- MINTY BRS. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, 22: 591–592.
- MORAIS MC, PARADELLA WR & RENNÓ CD. 2002. Mapeamento de lateritas mineralizadas em ferro do depósito de N1 (Carajás-PA) através de classificação textural de imagens de radar do SAREX'92. *Rev. Bras. Geoc.*, 32(3): 351–360.
- MURA JC, PARADELLA WR, DUTRA LV & TERUIYA RK. 2006. Metodologia da simulação de imagens MAPSAR a partir dos dados do sensor aerotransportado SAR-R99B do CENSIPAM. Relatório, 9 pp.
- NABIGHIAN NM, GRAUCH VJS, HANSEN RO, LAFEHR TR, LI Y, PIERCE JW, PHILLIPS JD & RUDER ME. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6): 33ND–61ND.
- NUNES AR. 2002. Análise de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto para geração de modelos prospectivos para a região de Serra Leste, Carajás (PA). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 132 pp.
- PARADELLA WR, SILVA FHF, ROSA NA & KUSHIGBOR CA. 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon region), based on digital TM-Landsat and DEM data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(8): 1633–1648.

- PARADELLA WR, SANTOS AR, VENEZIANI P, SANTANNA MV & MORAIS MC. 2000. Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rain forest environment of Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(2): 82–90.
- PARADELLA WR, SANTOS AR, VENEZIANI P, SILVA MMQ, MURA JO, RABELO TN, KNUST S, TERUIYA RK, MIRANDA FP, SOUZA FILHO CR & CRÓSTA AP. 2006. O satélite MAPSAR do programa espacial brasileiro: concepção, estado atual e potencial para aplicação nas geociências. In: *Congr. Bras. Geol.*, 43.: 2006, Aracaju. Anais. . . Aracaju: SBG, 2006, p. 152.
- PEDROSO EC. 1998. A utilização de imagens JERS-1/SAR e Landsat na caracterização espacial das mineralizações auríferas do tipo 'placer' da Província Mineral do Tapajós. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 151 pp.
- PEDROSO EC, RIVARD B, CRÓSTA AP, SOUZA FILHO CR & MIRANDA FP. 2001. Reconnaissance geologic mapping in the Tapajós Mineral Province, Brazilian Amazon, using spaceborne SAR imagery and airborne geophysics. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22: 669–678.
- PINHEIRO RVL & HOLDSWORTH RE. 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Ita-caiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. *Rev. Bras. Geoc.*, 30(4): 597–606.
- RABUS B, EINEDER M, ROTH A & BAMLER R. 2003. The shuttle radar topography mission – A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57: 241–262.
- ROEST WR, VERHOEF J & PILKINGTON M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1): 116–125.
- ROWAN LC & MARS JC. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84: 350–366.
- SANTOS AR, VENEZIANI P, PARADELLA WR & MORAIS MC. 2001. Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: aplicações (Interno). INPE/ADIMB, São José dos Campos-SP, 103 pp.
- SANTOS JOS, HARTMANN LA, RIKER SR, SOUZA MM, ALMEIDA ME & McNAUGHTON NJ. 2006. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 9.: Belém, 2006, Anais. . . Belém: SBG, 2006, CD-ROM.
- SOARES PC & FIORI AP. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Not. Geomorfol.*, Campinas-SP, 16(32): 71–104.
- SUITA MTF. 1988. Geologia da área Luanga com ênfase na petrologia do complexo básico-ultrabásico Luanga e depósitos de cromita associados, Pará. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 320 pp.
- TALLARICO FHB, COIMBRA CR & COSTA CHC. 2000. The Serra Leste sediment-hosted Au-(Pd-Pt) mineralization, Carajás Province. *Rev. Bras. Geoc.*, 30(2): 226–229.
- TANGESTANI MH, MAZHARI N & AGAR B. 2005. Mapping the porphyry copper alteration zones at the Meiduk area, SE Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. In: *Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, the International Society for Optical Engineering*, 5983: 172–181.
- TASSINARI CGC. 1996. O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos. Tese de livre docência. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 139 pp.
- VASCONCELLOS RM, METELO MJ, MOTTA AC & GOMES RD. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil, CPRM, Rio de Janeiro, 165 pp.
- VENEZIANI P & OKIDA R. 2001. Mapeamento geológico-estrutural da região do Projeto Platina (Serra Pelada) baseado em dados integrados RADARSAT-TM-Aerogeofísica. Relatório técnico (Inédito). 52 pp.
- VENEZIANI P, SANTOS AR & PARADELLA WR. 2004. A evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM LANDSAT-5), aerogeofísica e dados de campo. *Rev. Bras. Geoc.*, 34(1): 67–78.
- VILLAS RN & SANTOS MD. 2001. Gold deposits of the Carajás mineral province: deposit type and metallogenesis. *Mineralium Deposita*, 36: 300–331.
- ZACCHI ENP, SILVA AM, ROLIM VK & PORTUGAL RS. 2007. 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, CD-ROM.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Thais Andressa Carrino. Geóloga formada na Universidade Estadual de Campinas (2007), atualmente cursando mestrado em Geologia Regional na Universidade de Brasília. As áreas de interesse estão relacionadas à exploração mineral por meio do uso de dados e técnicas de sensoriamento remoto passivo e ativo (SAR), geofísica aérea, sistemas de informações georreferenciadas e favorabilidade mineral. Possui experiência em exploração petrolífera por meio da aplicação de métodos geoestatísticos e dados de perfis geofísicos à modelagem de reservatórios.

Carlos Roberto de Souza Filho. Engenheiro Geólogo (Universidade Federal de Ouro Preto, 1988), Mestre em Metalogênese (UNICAMP, 1991), PhD (Open University, Inglaterra, 1995), Jovem-Pesquisador (FAPESP-UNICAMP, 1995-1997), Professor-Doutor (UNICAMP, 1997-2002). Desde 2002, é Livre Docente do DGRN do IG-UNICAMP. Atualmente é Coordenador do Programa de Pós-graduação de Geociências, líder do Grupo de Geotecnologias do IG, pesquisador nível 1B do CNPq, pesquisador da NASA nos programas ASTER e Mars-Earth Analogs, e Editor-Associado da Revista *Computers & Geosciences*. Suas áreas de interesse compreendem mapeamento geológico e exploração mineral e petrolífera com base em dados e métodos de sensoriamento remoto, aerogeofísica e sistemas de informações georreferenciadas.

Emilson Pereira Leite. Pesquisador Colaborador do DGRN (Departamento de Geologia e Recursos Naturais) da UNICAMP, obteve seu doutorado em Geofísica pelo IAG/USP com estágio no *Department of Earth and Space Science and Engineering* da Universidade de York em Toronto, Canadá. Suas principais áreas de interesse são métodos potenciais, inversão de dados geofísicos, sensoriamento remoto e integração de dados geofísicos e geológicos para mapeamento do potencial mineral.