

A fusão digital de dados de sensores remotos e de aerogeofísica na interpretação geológica: o exemplo de Carajás

Athos Ribeiro dos Santos ¹
Waldir Renato Paradella ¹
Paulo Veneziani ¹
João Almiro Corrêa Soares ²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{athos, waldir, paulo}@itid.inpe.br

² Centro Gestor e Operacional do SIVAM – Centro Regional de Belém
Av. Júlio César, s/n, Val-de-Cans – 66617-420 – Belém – PA, Brasil
jalmiro@it.atech-mn.br

Abstract. Distinct remote sensing and aerogeophysical data were digitally integrated for geological application in the Carajás Mineral Province, Brazilian Amazon. The integration techniques were based on color modelling (IHS), Selective Principal Component and multiplication (SPC-SAR). The results have shown that a significant gain in information and confidence for the interpretation were due to: (1) distinct viewing perspectives (radar incidence/sun elevation, radar azimuth/sun azimuth) providing geological structural enhancements for all directions in the area; (2) the optical chromatic contribution which improves the interpretability of the radar data; (3) the information of lithological variation related to gammaespectrometric data that is added to the spatial attributes provided by the radar images and; (4) the contribution from the magnetic data related to the tectonic-structures and boundaries of geological units that are added to the geometric and spectral information provided by SAR and optical data.

Palavras-chave: geology, digital integration, remote sensing, Carajás, geologia, integração digital, sensoriamento remoto, Carajás

1. Introdução

A fusão digital de dados em sensoriamento remoto é um processo que busca integrar em um único produto dois conjuntos de informações distintas e complementares com relação ao objeto que se deseja analisar. É, portanto, um produto de valor agregado, de forma que forneça mais informações que os conjuntos isoladamente. Há diversas técnicas de integração de dados, desde a simples combinação de bandas (composições RGB), até procedimentos mais sofisticados como as transformações por modelos de cores (IHS), ou ainda, a combinação de transformações por componentes principais com operações aritméticas, entre outras.

A Amazônia é considerada, hoje, a região brasileira com a mais alta potencialidade em termos de recursos minerais e, também, o grande desafio a ser vencido, devido a sua extensão territorial, dificuldades naturais e ao conhecimento geológico ainda incipiente. A Província Mineral de Carajás concentra algumas das mais importantes jazidas minerais do país.

A utilização de dados indiretos – geofísicos e de sensoriamento remoto – tem sido uma ferramenta fundamental na cartografia e no entendimento da evolução geológica da Amazônia. Os sensores ópticos, que incluem desde as fotografias aéreas até os imageadores multiespectrais orbitais, são os de uso mais difundido na geologia. Apesar disto, os sensores de radar, desde o Projeto RADAM na década de 1970 até os atuais SAR orbitais, têm se mostrado os mais adaptados para estudos geológicos na Amazônia, pelo excelente realce da morfologia do terreno

dados pela visada lateral e pelo imageamento sob condições atmosféricas desfavoráveis. Há uma diferença fundamental entre os dados obtidos por sensores ópticos e de radar. Os primeiros utilizam a energia solar refletida para obter informações físico-químicas do terreno enquanto os SAR obtêm informações geométricas e das propriedades elétricas da superfície.

Os dados geofísicos utilizados, gamaespectrométricos e magnetométricos do Programa Geofísico Brasil – Canadá, são diferentes com relação ao alvo e ao tipo de informação fornecida. Os dados radiométricos contêm informações relacionadas diretamente à variações composicionais das rochas aflorantes. Já, os dados magnetométricos estão associados à variações do campo geomagnético, fornecendo informações de subsuperfície relacionadas, principalmente, com a estrutura dos corpos rochosos.

Este artigo apresenta exemplos de fusão digital de dados de sensoriamento remoto orbital (TM Landsat-5 e RADARSAT-1) e de levantamentos aerogeofísicos (gamaespectrometria e magnetometria) e discute a sua contribuição em estudos geológicos na região da Província Mineral de Carajás (**Figura 1**).

2. Contexto Geológico

A **figura 1** sintetiza as feições regionais tectono-estratigráficas da área de estudo, que engloba grande parte da Serra dos Carajás e de seu entorno, na porção sudeste do Craton Amazônico, estável desde o final do Pré-Cambriano (Almeida et al., 1981).

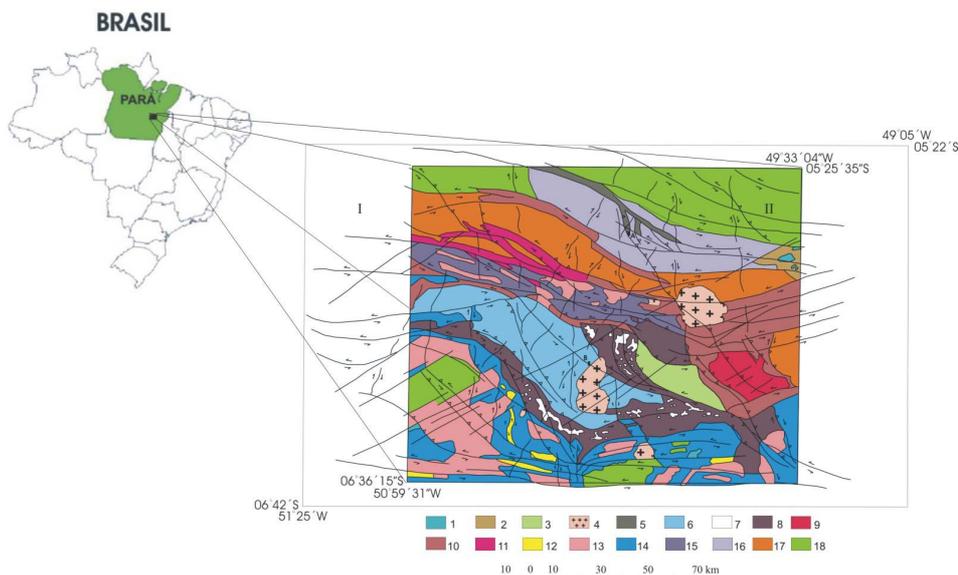


Figura 1. Mapa tectono-estratigráfico da região de Carajás. LEGENDA: Unidades geológicas: 1 – intrusivas básicas; 2 – Grupo Serra Grande; 3 – Formação Gorotire; 4 – Granitos Anorogênicos; 5 – Grupo Buritirama; 6 – Formação Águas Claras; Grupo Grão-Pará (7 – Formação Carajás; 8 – Formação Parauapebas, incluindo o Complexo Luanga e o Grupo Rio Novo); 9 – Complexo Granítico Estrela; 10 - Grupo Pojuca; 11 – Grupo Igarapé Salobo; 12 – Grupo Sapucaia; 13 – Suite Plaquê; Complexo Granítico – Gnáissico (14 – Complexo Xingu Indiferenciado, 15 – Complexo Xingu A, 16 – Complexo Xingu B, 17 – Complexo Xingu C, 18 – Complexo Pium e Suite Monte Bacajá). Fonte: Veneziani et al. (2004).

A área de estudo está incluída no Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de idade arqueana (Araújo & Maia, 1991) e é constituída, essencialmente, por rochas metavulcânicas e metassedimentares principalmente do Supergrupo Itacaiúnas (unidades 7, 8, 10 e 11, Fig. 1) e pelos sedimentos arqueanos da Formação Águas Claras, que constituem o corpo das serras dos Carajás, Cinzento e Boqueirão. Os terrenos arrasados, que ocorrem no entorno dessas serras, são formados, principalmente, por gnaisses tonalíticos à granodioríticos e meta-supracrustais do Complexo Xingu, além de extensas ocorrências de rochas granulíticas e charnoquíticas da Suite Monte Bacajaí, à norte (DOCEGEO, 1988). Ocorrem diversos corpos de granito anorogênico com idades radiométricas de cerca de 1,88 Ga. (Machado et al., 1991).

3. Conjunto de dados

Os dados aerogeofísicos fazem parte do Projeto Geofísico Brasil – Canadá (PGBC), realizado no período de 1975 – 1976. Os dados gamaespectrométricos (canal K não disponível para a área deste trabalho) foram obtidos através de linhas de vôo no sentido N-S, espaçadas de 1 quilômetro, com intervalo de amostragem equivalente a 65 metros na superfície. Os dados magnetométricos foram obtidos com as mesmas características, porém com um espaçamento entre as linhas de 2 quilômetros.

Satélite	Sensor/ Imagem	Banda/ Posição	Data	Resolução Espacial (m)	Elev. Solar/ Incidência	Az. Solar/ Az. de Iluminação
Landsat-5	TM	1,2,3,4,5,7	31/05/1984	30	43°	49°
			11/06/1984	30	43°	49°
			22/06/1992	30	43°	49°
RADARSAT-1	SAR (C-HH) Standard	S5D*	31/05/96	24,2x27	36/42°	282°
	SAR (C-HH) ScanSAR Narrow	SN2D*	15/11/96	55,1x71,7**	31/46°	282°

* D= órbita descendente ** reamostrado para 100 metros neste trabalho (Soares 2003)

Tabela 1. Principais características dos dados de sensoriamento remoto utilizados na pesquisa.

4. Integração

Duas técnicas de integração, por apresentarem bons resultados em aplicações geológicas (Harris et al., 1994; Paradella et al., 1998, 2001), são exemplificadas neste trabalho: a IHS e a combinação de Componentes Principais com multiplicação.

Para assegurar medidas de atributos de mesma localização no terreno, as imagens de sensoriamento remoto foram submetidas a um processo de correção geométrica (orto-retificação). O sistema de integração IHS combina dados acromáticos (I) e cromáticos (H). As imagens de radar, por representarem informações de alta frequência espacial, foram utilizadas na substituição do canal intensidade (I). As imagens TM Landsat-5 e os dados geofísicos gamaespectrométricos e magnetométricos foram utilizados na substituição do canal matiz (H). A seleção do triplete RGB do TM Landsat-5 utilizada na integração IHS foi baseada no critério estatístico OIF (Chaves Jr. et al., 1982). Utilizou-se, também, a abordagem SPC (*Selective Principal Component Analysis*), que utiliza subconjuntos de bandas TM Landsat altamente correlacionadas em uma TCP (Transformação por Componentes Principais) objetivando maximizar a quantidade de informações no triplete (Paradella et al., 1999). Ao canal saturação (S) é atribuído um valor

constante para que se obtenha um efeito de mistura proporcional de matiz e intensidade (maiores detalhes sobre a técnica de integração IHS em Harris et al., 1994 e Paradella et al., 1997). No caso da combinação aritmética por multiplicação, o triplete TM Landsat-5 foi selecionado aplicando-se a técnica SPC e multiplicado pela imagem Standard RADARSAT-1. Segundo Paradella et al., (2001), neste caso os dados originais de matiz não sofrem distorções porque os atributos de intensidade, de matiz e de saturação não são passíveis de separação no espaço RGB.

5. Resultados

A **figura 2** exemplifica três diferentes integrações na área da Folha Carajás (1: 100.000) (porção centro-sul da Fig. 1). A **figura 2A** é o resultado da fusão digital (transformação RGB-IHS) de uma imagem RADARSAT-1, modo Standard 5, descendente (S5D) com uma imagem gama Contagem Total (CT). Esta área engloba rochas que compõem a Serra dos Carajás (principalmente do Grupo Grão Pará e da Formação Águas Claras) e de seu entorno (Complexo Xingu, Suite Plaquê, etc.). Dois granitos anorogênicos destacam-se, no centro e no extremo sudeste da área (Fig. 1). Observa-se uma perfeita concordância entre os diferentes tipos de relevo das unidades geológicas registrados pelos dados SAR e as variações de matiz associadas as respostas radiométricas das rochas, confirmando o alto grau de sinergia e de complementaridade de informações na interpretação geológica do produto integrado S5D & gama CT. Isto ocorre desde as mais baixas respostas gama (matizes azuis) associadas aos relevos escarpados das áreas de ocorrência das seqüências metavulcano-sedimentares do Grupo Grão Pará (Fig. 2A, letra A), passando pelas respostas intermediárias (matizes verde – amarelados) das áreas de planície do Complexo Xingu (Fig. 2A, letra B), até as mais altas respostas radiométricas (matizes vermelhos) associadas aos relevos colinosos do Granito Central (Fig. 2A, letra C).

Com relação aos corpos graníticos que ocorrem na área da **figura 2A**, há alguns aspectos que merecem ser realçados. No extremo sudeste da área, ocorrem dois corpos de composição granítica: um orientado segundo a estruturação regional, pertencente a Suite Plaquê, de idade arqueana (Fig. 2A, letra D); outro de forma circular, anorogênico e de idade proterozóica (Fig. 2A, letra E). Apesar de apresentarem altas respostas radiométricas em níveis similares (matizes vermelhos), os tipos de relevo associados aos corpos sugerem origens distintas. A ocorrência da Suite Plaquê se confunde com o relevo arrasado ao seu redor, formado pelas rochas gnáissicas do Complexo Xingu, enquanto o corpo de granito anorogênico destaca-se pelo seu relevo movimentado. A associação das informações SAR & gama CT permite, com segurança, individualizá-los e classificá-los em categorias diferentes. No centro da área ocorre o principal corpo de granito anorogênico proterozóico da região de Carajás. Ele é caracterizado, nesta ilustração, por um relevo colinoso, deprimido com relação as bordas, e por altas respostas de gama CT (matizes avermelhados). Variações de matiz e de formas de relevo dentro do corpo permitiram a Paradella et al. (1998) separar duas faixas, uma na porção externa (Fig. 2A, letra F) e outra na parte central do corpo (Fig. 2A, letra C). Perfis petrográficos detalhados indicaram que estas áreas representam variações faciológicas dentro do corpo granítico, constituídas, respectivamente, por anfibólio - biotita monzogranito e por biotita – anfibólio sienogranito, biotita sienogranito e biotita monzogranito (Dall’Agnol et al., 1994).

Com relação as estruturas geológicas, no caso da fusão S5D & gama CT (Fig. 2A), deve-se considerar, fundamentalmente, as características dos dados SAR, já que a cor atribuída aos dados gama não tem papel determinante na caracterização desses elementos. Neste caso, fica evidente a importância dos dados SAR como responsáveis pela textura e estrutura fotográficas, devido a sua

visada lateral que tem como característica principal o realce morfológico. O maior ou menor realce das estruturas depende, portanto, da geometria de iluminação (incidência e azimute) da imagem S5D. A incidência ($35^{\circ}/42^{\circ}$) é adequada para um bom realce morfológico, sem excesso de áreas sombreadas e sem efeitos graves de deslocamento de relevo (*layover*). O azimute de iluminação de 282° atenua ou mesmo suprime as estruturas ao redor desta orientação (WNW-ESE) e tem seu pico de realce a 90° dessa orientação (NNE-SSW) (Fig. 3). Estas observações podem ser avaliadas na imagem da **figura 2A** através da identificação de estruturas posicionadas em diferentes direções.

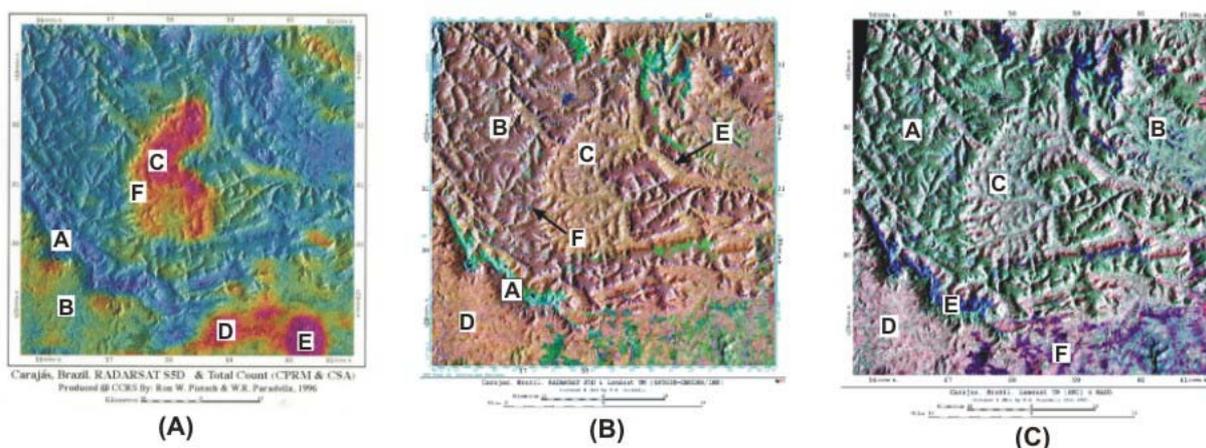


Figura 2. Exemplos de fusão digital na Folha Carajás: (A) Integração S5D & gama CT; (B) S5D & TM4R5G3B por IHS; (C) SPC TM & S5D por multiplicação. As letras estão explicadas no texto. Fonte: Paradella et al. (2001).

As **figuras 2B** e **2C** exemplificam duas técnicas de fusão digital de dados SAR (Standard RADARSAT-1) e ópticos (TM Landsat-5). A **figura 2B** mostra o produto integrado pela técnica IHS, S5D & TM4R5G3B, cuja composição TM foi obtida pelo processo estatístico OIF. Já, a **figura 2C** contém a integração SPC TM & S5D, onde cada canal da composição SPC TM foi multiplicado pela imagem SAR S5D, com escalonamento automático para 256 níveis de representação digital (Paradella et al., 2001). As duas imagens apresentam uma ótima performance na interpretação de dados litoestruturais. Paradella et al. (2001) explicam que o ótimo realce morfológico nestas imagens advém da combinação da contribuição da intensidade do SAR (o azimute de iluminação de 282° implica no máximo realce de estruturas em $N12E \pm 20^{\circ}$ e na iluminação frontal voltada para E. A incidência de $35^{\circ}/42^{\circ}$ determina um sombreado adequado ao relevo da área) e da contribuição adicional ligada à iluminação solar (azimute solar de 49° implica no máximo realce de estruturas em $N41W \pm 20^{\circ}$ e na iluminação voltada para NE. A elevação solar de 49° é equivalente a incidência do S5D). A **figura 3** esquematiza essa contribuição.

No produto integrado S5D & TM 4R5G3B (Fig. 2B) observa-se uma boa definição das unidades geológicas (comparar com a Fig. 1), destacando-se a perfeita caracterização das lateritas mineralizadas em ferro da Formação Carajás (Fig. 2B, letra A), a Formação Águas Claras (Fig. 2B, letra B), o Granito Central (Fig. 2B, letra C) e a área de ocorrência do Complexo Xingu (Fig. 2B, letra D). O realce do relevo dado pelas diferentes iluminações é determinante para a caracterização das principais linhas estruturais (ver Fig. 1), exemplificadas pelo Falhamento de Carajás (Fig. 2B, letra E) e pelo proeminente sistema de estruturas N-S (Fig. 2B, letra F).

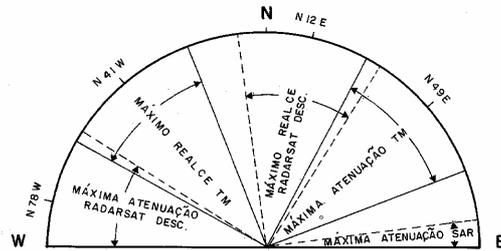


Figura 3. Esquema de direções de realce e de atenuação das imagens S5D Radarsat-1 e TM Landsat-5. Fonte: Paradella et al. (2001).

O produto integrado obtido pela técnica de multiplicação SPC TM & S5D (Fig. 2C) apresenta um evidente ganho em termos de discriminação das unidades geológicas, quando comparado com a imagem obtida por IHS (Fig. 2B), devido principalmente a sua grande gama cromática. Isto é evidenciado pelos contrastes espectrais entre as unidades: Formação Águas Claras (Fig. 2C, letra A), Formação Gorotire (Fig. 2C, letra B), Granito Central (Fig. 2C, letra C), Complexo Xingu (Fig. 2C, letra D), lateritas mineralizadas (Fig. 2C, letra E) e classes de uso da terra (Fig. 2C, letra F). Segundo Paradella *et al.* (2001), a integração por multiplicação apresenta, também, a vantagem de um processamento mais simples quando comparado com a técnica IHS, porém esta permite mais opções de realce pela manipulação independente de intensidade, matiz e saturação.

A seguir, são exemplificadas duas fusões digitais através da técnica IHS, utilizando-se dados magnéticos, respectivamente, de amplitude e fase do sinal analítico. As imagens englobam, praticamente, toda a área da **figura 1**. A **figura 4** mostra a fusão da imagem RADARSAT-1 ScanSAR Narrow, órbita descendente, posição 2 (SND2), com o derivativo amplitude magnética do sinal analítico (ASA). A **figura 5** mostra a multiplicação pela técnica *merge* (detalhes em Soares, 2003) da banda 5 do TM Landsat 5 pela imagem RADARSAT-1 ScanSAR Narrow, órbita descendente, posição 2 (SND2), integrada com o derivativo fase magnética do sinal analítico (FSA). Segundo Soares (2003), os dados magnéticos foram submetidos à processamentos com o objetivo de eliminar ruídos de caráter operacional e de fontes desprezíveis (remoção do campo magnético regional, micronivelamento dos dados) e à filtragens objetivando separar os efeitos mais superficiais (filtros derivativos). A partir dessas filtragens é possível mapear os contrastes magnéticos através da função sinal analítico, que é uma técnica eficiente na definição da geometria e profundidade de corpos magnéticos.

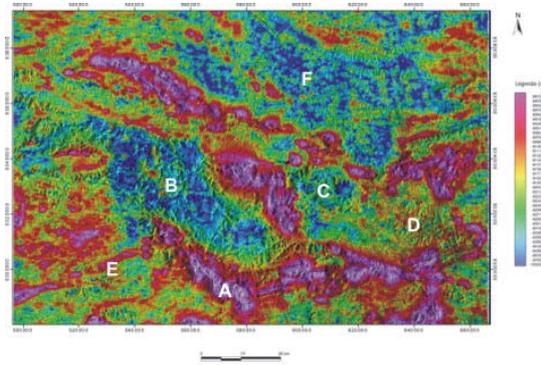


Figura 4. Produto integrado SND2 & ASA. As letras estão explicadas no texto. Fonte: Soares (2003).

Observa-se na **figura 4** que há uma boa associação entre o realce de relevo proporcionado pela imagem RADARSAT-1 SND2 e as respostas de amplitude magnética. A geometria de iluminação da imagem SAR (incidência: 31-46° e azimute : 282°) mostra-se adequada para o realce morfológico, principalmente nas áreas de relevo mais movimentado, que representam principalmente as seqüências metavulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas. Estas áreas estão associadas as mais altas respostas magnéticas (matizes avermelhados), em especial as áreas de laterita mineralizadas em ferro da Formação Carajás (Fig. 4, letra A). A ocorrência comum de formações ferríferas nas unidades da Supergrupo Itacaiúnas é a principal responsável pelas altas respostas magnéticas. Essa sinergia entre os dados geofísicos e os de sensoriamento remoto pode ser observada também em outras partes como, por exemplo, nas áreas de ocorrência da Formação Águas Claras (Fig. 4, letra B), da Formação Gorotire (Fig. 4, letra C), do Complexo Granítico Estrela (Fig. 4, letra D), etc. As áreas de ocorrência do Complexo Xingu mostram grandes variações de respostas magnéticas, desde altas a médias (Fig. 4, letra E), até baixas (Fig. 4, letra F), indicando uma significativa variação na composição (magnética) das rochas incluídas neste complexo. Uma subdivisão baseada no predomínio de tipos litológicos para o Complexo Xingu nesta área foi proposta por Veneziani et al. (2004) (Fig. 1).

A **figura 5** (TM5xSND2 & FSA) é um exemplo de sinergia entre as feições lineares magnéticas realçadas pela fase do sinal analítico e as feições lineares geométricas fornecidas pelos dados SAR e ópticos com o objetivo de melhorar a caracterização das estruturas geológicas. Como exemplo cita-se duas importantes estruturas: a Falha Transcorrente de Carajás (Fig. 5, letra A) e a pouco conhecida estrutura NE-SW que corta toda a Província de Carajás (Fig. 5, letra B).

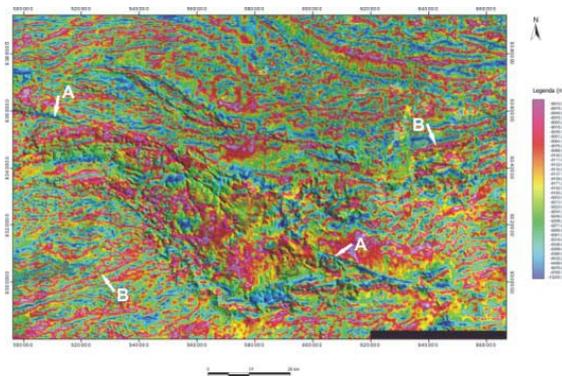


Figura 5. Produto integrado TM5xSND2 & FSA. As letras estão explicadas no texto. Fonte: Soares (2003).

4. Conclusões

O estudo permite as seguintes conclusões principais: (1) a fusão digital de dois ou mais tipos de dados (sensoriamento remoto e geofísica) aumenta em muito a sua interpretabilidade em termos de informações geológicas; (2) a integração requer que os dados sejam compatíveis e complementares e, passíveis de uma rigorosa correção geométrica que assegure medidas de atributo de mesma localização no terreno; (3) os dados SAR são os ideais para representar a textura no produto integrado (canal I, na integração IHS) pelo seu grande poder de realce da geometria do terreno, enquanto que a adição de cores (canal H) através das imagens TM-Landsat-5 é importante pelas suas informações espectrais superficiais e pela possibilidade adicionar uma nova geometria de iluminação aos dados SAR, ou através dos dados gama pela sua capacidade de

mapear variações composicionais superficiais, ou através dos dados magnéticos pelas suas informações estruturais e sobre variações composicionais (magnéticas); (4) no entanto, deve-se observar que, diferentemente dos dados gama, os dados magnéticos devem ser utilizados apenas como um indicativo das variações das características magnéticas das rochas em sub-superfície; (5) a integração por multiplicação é uma técnica de processamento mais simples, porém com menores possibilidades de realces, quando comparada com a técnica IHS.

Referências

- Almeida F. F. M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck R. A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Science Review**, n.17, p. 1-9, 1981.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N. Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A. **Rel. Final**. CPRM, Rio de Janeiro, 136p., 1991.
- Chavez Jr., J.P., Berlin, G.L., Sowers, L. B. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. **Journal of Applied Photographic Engineering**, n. 8, p. 23-30, 1982.
- Dall'Agnol R., Barros C.E., Magalhães M.S., Villas R.N.N., Javier Rios F., Nogueira A.C.R., Silva C.M.G., Soares A.D.V., Vieira E.A.P., Martins L.P.B. Estudo petrográfico da borda oeste do Granito Central e dos corpos máficos associados à Formação Águas Claras. **Relatório Final** do Projeto CVRD/UFPA, 174p., 1994.
- DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: Cong. Bras. Geologia, 25, Belém, **Anexo**, p. 10-54, 1988.
- Harris J. R., Bowie C. , Rencz A. N., Graham D. Computer-Enhancement Techniques for the Integration of Remotely Sensed, Geophysical, and Thematic Data for the Geosciences. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 3, p. 210-221, 1994.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krough T.E., Lindenmayer D. U-Pb Geochronology of Archean Magmatism and Basement Reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. **Precambrian Research**, n. 49, p. 329-354, 1991.
- Paradella W.R., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and Gamma Ray Spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n.7, 1483-1501, 1997.
- Paradella W.R., Santos A.R., Dall'Agnol R., Pietsch R.W., Sant'Anna M.V. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás Granite area, Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 4, p. 376-392, 1998.
- Paradella, W. R., Santos, A.R., Veneziani, P., Morais, M. C., Sant'Anna, M. V. Avaliação de Dados do RADARSAT-1 em Aplicação Geológica na Província Mineral dos Carajás. **Rel. FAPESP 97/10946-4**, 131p., 1999.
- Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Veneziani, P.; Morais, M.C. O sinergismo de imagens standard descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do LANDSAT-5 em aplicação geológica na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. Sessão Técnica Oral. p. 315-322. Repositório da URLib: <dpi.inpe.br/lise/2001/09.14.11.53>. Disponível em: <<http://iris.sid.inpe.br:1908/rep/dpi.inpe.br/lise/2001/09.14.11.53>>. Acesso em: 12 jun. 2002.
- Pinheiro R.V.L. **Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike Slip Systems, Amazon, Brazil**. 1997, 408p. , Ph.D Dissertation, University of Durham, UK.
- Soares J. A. C. **Tratamento e integração de imagens SAR (RADARSAT/ScanSAR) e multiespectrais (Landsat/TM) com dados aeromagnetométricos para estudos geológicos na Província Mineral de Carajás – PA**. 2003, 130p. , Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos.
- Veneziani P., Santos A.R., Paradella W.R. 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. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 1, p. 67-78, 2004.