

O Sinergismo de Imagens Standard Descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do LANDSAT-5 em Aplicação Geológica na Amazônia

WALDIR RENATO PARADELLA

ATHOS RIBEIRO DOS SANTOS

PAULO VENEZIANI

MARIA CAROLINA DE MORAIS

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{waldir, athos, paulo, morais@ltd.inpe.br}

Abstract This paper discusses fundamentals and related aspects of the digital integration (fusion) of RADARSAT-1 (Standard descending) and Landsat 5 (TM) data for geological application in the Amazon Region. Special emphasis is placed on the Selective Principal Component-SAR (SPC-SAR) integration based on IHS and arithmetical (multiplication) schemes, producing value-added SAR/Optical products that facilitate the geological photointerpretation in the moist tropics.

Keywords: RADARSAT/Landsat integration, geology, Brazilian Amazon Region.

1 Introdução

Imagens de radar de abertura sintética (SAR) são valiosas no fornecimento de informações geológicas na Província de Carajás (Paradella et al. 1997, 1998, Santos et al. 1999). Como na região são comuns chuvas, nuvens, brumas e fumaça, o uso do SAR é vantajoso pelo realce topográfico da visada lateral e imageamento sob condições atmosféricas desfavoráveis.

Distinto dos sensores ópticos que usam a energia solar refletida para prover informações físico-química do terreno, um SAR fornece informação da geometria da superfície e de suas propriedades elétricas, pela detecção da energia retroespalhada quando o sensor ilumina a superfície, sob um campo definido de microondas ativas. A performance de imagens ópticas no realce de estruturas geológicas na Província apresenta limitações devido à iluminação solar com azimute constante e elevação sob alto ângulo no período de disponibilidade de imagens. Isto resulta em realce e atenuação de estruturas segundo direções constantes e pobre sombreamento .

A interpretação baseada somente no radar também apresenta limitações. A informação mais evidente é a estrutural, enquanto que a discriminação de litologias nem sempre é tarefa simples. O parâmetro chave que controla a resposta de unidades litológicas no SAR é a expressão superficial (tonalidade, textura, contexto, etc.) dada pela topografia (variações de mergulho) e rugosidade superficial (variação na escala do comprimento de onda do SAR). Deve ser salientado que apesar da maior penetrabilidade do SAR em relação ao imageamento óptico, a interação das microondas com rochas é quase ausente, restringindo-se à parte superior do dossel vegetal para a banda C-HH. Em outras palavras, a ausência do componente cromático dificulta a extração de informação com as imagens SAR .

Do exposto, a combinação de imagens SAR e ópticas é uma tendência natural na perspectiva geológica, posto que ambos os dados são de natureza distinta e complementares. No caso de Carajás, os fatores que controlam a informação geológica nas imagens RADARSAT-1 estão ligados à geometria de iluminação sensor-terreno (azimute de visada e incidência). No caso do TM-Landsat, a radiância das bandas é controlada pelo espectro da floresta equatorial ombrófila e pela orientação topográfica do terreno em relação à fonte solar (Paradella et al. 2000b). É importante considerar que o objetivo da fusão digital é produzir um produto de valor agregado, no qual cores e texturas possam ser interpretados geologicamente, com o SAR contribuindo com a informação espacial (estruturas, texturas), as imagens ópticas controlando a informação espectral (cromaticidade) ligada à interação da vegetação com o relevo. Assim, o objetivo do trabalho foi o de investigar os aspectos relevantes na integração RADARSAT/TM, visando a otimização deste sinergismo, a partir de imagens Standard e TM disponíveis para Carajás.

2 Fundamentação

A combinação de dados no sensoriamento remoto é conhecida como fusão e é conduzida segundo a regra de que o procedimento deve combinar dados complementares entre si, de modo que o produto resultante forneça mais informação que a dos componentes isoladamente. A complementariedade na integração radar/óptico tem sido enfatizada por vários autores em geologia (Rheault et al. 1991, Harris et al. 1994, Mason et al. 1994, Paradella et al. 1997).

A fusão da informação de diferentes sensores envolve duas etapas. Primeiro, as imagens devem estar geometricamente registradas entre si, assegurando assim medidas de atributos de mesma localização no terreno. Em segundo lugar, as informações espectrais e espaciais combinadas geram um produto integrado final que contenha o melhor dos dados originais. Cinco técnicas tem sido utilizadas na integração SAR/Óptico (Lewis et al. 1998, Harris et al. 1999): (1) combinação de bandas (composições RGB), (2) combinações aritméticas (multiplicação, adição, subtração, soma), (3) transformações estatísticas (componentes principais, regressões), (4) transformações espaciais (decomposição wavelet multiresolução) e (5) transformações por modelos de cores (IHS). O desempenho em geologia indicou que o modelo IHS e a multiplicação forneceram resultados melhores (Harris et al. 1994).

As cores são descritas no modelo IHS em termos de intensidade, matiz e saturação. A transformação das cores de um sistema RGB para um IHS segue modelos representados geometricamente por cones (ou hexacones) e cilindros. Como a percepção de cores decresce com a intensidade (a influência do matiz e da saturação são insignificantes sob valores baixos de intensidade), as transformação IHS baseadas em modelos de cones tem-se mostrado mais adequadas. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser vistos em Harris et al. (1999). Neste tipo de integração dois conjuntos de dados são combinados: acromáticos e cromáticos. O primeiro relaciona-se com a intensidade e sua manipulação visa melhorar a expressão da geometria do terreno pelo sombreamento no produto final. Idealmente para se evitar distorções de matiz, a imagem usada para substituir a intensidade calculada deve ser correlacionada com a intensidade original, o que nem sempre ocorre. Imagens de radar tem sido consideradas ideais para "inputs" de intensidade na integração IHS, pois representam informação de elevada frequência espacial (estruturas, texturas).

Em relação aos dados cromáticos, uma grande variação de cores é desejada no produto final. Numa composição colorida com três canais TM, áreas de alta correlação espectral nas

imagens serão representadas por gradações de cinza, e projetadas no eixo de acromaticidade do cubo (RGB), e irão se alinhar no eixo de intensidade do cone (IHS). Se a imagem calculada de intensidade é substituída por outra imagem (p.ex. um SAR), as áreas de alta correlação não serão realçadas no produto integrado. Assim, o uso do realce por decorrelação nos canais originais, antes da transformação RGB/IHS, propiciará maior gradação de cores (Harris et al. 1994).

O critério estatístico OIF (Chavez Jr. et al. 1982) tem sido usado em Carajás na seleção de canais TM-Landsat na integração com dados SAR (Paradella et al. 1997, 1998). Como meio de maximizar a quantidade de informação da composição colorida (tripleto RGB), e minimizar a informação perdida com o não uso das bandas restantes, a abordagem SPC-SAR proposta por Paradella et al. (1999), foi avaliada no trabalho. A abordagem é baseada na "Selective Principal Component Analysis" e foi proposta preliminarmente por Chavez Jr. et al. (1984) e melhor formulada por Chavez Jr. & Kwarteng (1989). A técnica usa subconjuntos de bandas TM altamente correlacionadas, como "inputs" em uma TCP (Transformação por Componentes Principais). Agrupando-se imagens seletivamente, a TCP mapeará a maioria da informação (variância) no primeiro componente pela correlação elevada entre as imagens usadas, e aos componentes restantes estará relacionado um nível maior de ruído. Os sub-conjuntos de canais escolhidos foram TM 1, 2, 3 (grupo 1) e TM 5 e 7 (grupo 2). Os primeiros componentes da TCP foram combinados com a banda 4 e usados como tripleto na transformação RGB-IHS. Deste modo usou-se um conjunto de 3 bandas TM que modelam satisfatoriamente todo o espectro da vegetação (absorção por pigmentos fotossintéticos pela 1PC123; absorção por água, celulose e compostos com carbono pela 1PC57; e espalhamentos devido às interfaces água-ar e paredes das células pela TM4). Na transformação IHS/RGB, a imagem SAR é usada como intensidade. A manipulação da saturação dependerá do que se busca realçar na fusão. Valores variáveis de saturação resultam em mistura de proporções variadas das três cores primárias. O realce linear na saturação, previamente à transformação IHS/RGB, resultará em um produto com cores saturadas, i. é., com redução do efeito da intensidade. Atribuindo-se valor constante para a saturação, é obtido um efeito de mistura proporcional de matiz e intensidade (os valores de saturação são plotados na mesma distância ou raio no cone). Finalmente, foi também testada a combinação aritmética por multiplicação. No caso, as imagens SPC foram multiplicadas pela imagem SAR. Nesta situação, a informação original de matiz é imune às distorções, já que os atributos de intensidade, matiz e saturação não são separáveis no espaço RGB.

3 Área Teste

A área de pesquisa corresponde à carta topográfica 1:100.000, SB-22-ZA-II, Folha Serra dos Carajás. Fisiograficamente, relaciona-se com um relevo de serras e platôs, altitudes de até 850 metros e constituído por sedimentos da Formação Águas Claras e rochas vulcano-sedimentares das Formações Carajás e Parauapebas. No centro da área, a uma altitude de 450 a 500 metros e relevo colinoso suave, ocorre um batólito granítico, o Granito Central. No entorno da Serra, afloram rochas gnáissicas do Complexo Xingu, em planícies de altitudes médias de 200 a 300 metros (figura 1). A região é totalmente coberta por Floresta Equatorial (Paradella et al. 1994).

4 Dados Sensores

Imagens TM-Landsat 5 foram adquiridas em 1992 como parte do experimento SAREX. A imagem Standard 5 do RADARSAT-1 foi coletada em 1996 dentro do programa ADRO. As características das imagens ópticas e SAR são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Características das imagens RADARSAT e TM usadas na pesquisa

Plataforma	Sensor	Data de Aquisição	Ângulo Incidente	Resolução Espacial (m)	Iluminação
RADARSAT-1	Standard 5	31.mai.1996	35°/42°	24.2 x 27	Azimute = 282°
Landsat-5	TM	22.junho.1992	----	30 x 30	Azimute e Elev. Solar = 49°/43°

5 Resultados e Discussões

Inicialmente, foi aplicada uma correção de padrão de antena na imagem SAR, por ser uma cena adquirida durante a fase de validação do RADARSAT-1, posteriormente escalada de 16 para 8 bits por equalização linear. A atenuação do speckle foi feita através de filtro mediana (7 x 7 pixels) durante a ortorretificação, discutida a seguir.

A área teste apresenta variação de relevo e a correção geométrica das imagens deve levar este aspecto em consideração. A ortorretificação foi feita através do software "Satellite Ortho & DEM" da PCI, com o uso de um DEM e de 15 e 17 pontos de controle no terreno (gcps) extraídos da carta topográfica, para as imagens Standard e TM, respectivamente. A qualidade da correção geométrica é estimada pelos valores de erros quadráticos médios (rms) e resíduos em relação aos gcps. Os resultados indicaram valores para o SAR de 37,42 metros e para o TM de 38,76 metros. De modo a manter um balanço entre a integridade geométrica e radiométrica dos dados (acurácia obtida pouco maior que um elemento de resolução espacial), foi escolhido um espaçamento comum de pixel de 30 metros.

A figura 2 mostra o diagrama geral das direções esperadas para realce e atenuação de estruturas, segundo as geometrias de iluminação do SAR e fonte solar. Estudos demonstraram que para um dado azimute de iluminação, feições topográficas alinhadas ($\pm 20^\circ$) com a iluminação podem ser invisíveis, enquanto aquelas dispostas ortogonalmente serão realçadas (Harris 1991). Na figura 3 (A,B) são mostradas a composição TM 4R5G3B indicada pelo OIF e Decorrelacionada, e o produto integrado correspondente, utilizando-se o SAR como intensidade.

De modo geral, há uma grande melhoria na percepção do relevo no produto integrado (fig. 3 B), facilitando a extração de informações estrutural e litológica, p. ex., realce de estruturas internas do Granito Central (letra A), lineamentos do sistema de falhamento sinistral Carajás e NS (letras B, C), detecção da Fm. Águas Claras e lateritas mineralizadas em ferro (letras D, E). O realce de relevo seria causado pela combinação da (1) contribuição da intensidade do SAR, com maximização de detecção de estruturas segundo N12E ($\pm 20^\circ$), com iluminação frontal voltada para E e sombreamentos para W; e (2) contribuição adicional de realces topográficos ligados à iluminação solar com maximização segundo N41W ($\pm 20^\circ$). Assumindo-se que o TM controla a informação de matiz e saturação, as vertentes frontais à iluminação do SAR (para E) e à fonte solar (para NE), estariam relacionadas com valores maiores de intensidade no hexacore, e conseqüentemente, teriam maior influência cromática. Em contrapartida, encostas opostas nos dois imageamentos (para W e SW) seriam regiões de intensidade baixa no sistema IHS (sombas ou oclusões no SAR, sombas no TM). Em ambos os casos, a combinação resulta na ausência de cores nas encostas, e no aumento do sombreamento no produto integrado pelas duas geometrias

de iluminação. Deve ser mencionado ainda que estruturas segundo N78W ($\pm 20^\circ$) são atenuadas no produto integrado quando comparadas com a composição TM, devido ao paralelismo com a iluminação do SAR (letra A, fig. 3A). Em adição, o efeito de máxima atenuação estrutural pelo TM (N49E $\pm 20^\circ$) não foi relevante na integração, já que foi usado o SAR, que o compensou.

No SPC-SAR, os resultados estatísticos da TCP das bandas do visível indicam que a CP-1 concentrou 91,60 % da informação original, e que a CP-1 das bandas do infravermelho concentrou 97,25 %. O produto integrado é mostrado na figura 3C. A análise entre as figuras 3B e 3C indica que na discriminação de alvos há grande melhoria no produto SPC-SAR, evidenciada pelos contrastes espectrais entre as unidades Fm. Águas Claras (letra A), Fm. Gorotire (letra B), Granito Central (letra C), Complexo Xingu (letra D), lateritas mineralizadas (letra E) e classes de uso da terra (letra F). Aliando a excelente percepção de relevo com grande gama cromática, o SPC-SAR é uma ferramenta poderosa para aplicações geológicas na região.

Por último, foi também avaliada a combinação SPC-SAR por multiplicação. Cada canal da composição SPC foi multiplicado pelo SAR, com escalonamento automático para os 256 níveis de representação digital (fig. 3D). A análise visual indica uma redundância de informação com a integração via IHS fornecendo quase os mesmos resultados. A vantagem da integração SPC-SAR pela multiplicação está no processamento mais simples, porém a fusão via IHS permite mais opções de realce pela manipulação independente de intensidade, matiz e saturação.

6 Conclusões

A investigação permitiu as seguintes conclusões: (1) uma correção geométrica rigorosa e cuidados no espaçamento de pixel são requisitos básicos para a fusão evitando-se artefatos; (2) o produto Standard/TM ampliou as condições de interpretabilidade geológica de imagens SAR e TM, consideradas isoladamente. Agregar conteúdo cromático à imagem SAR é importante na diminuição da subjetividade da fotointerpretação. Por outro lado, a detecção de estruturas do TM melhora com o SAR; (3) a integração SPC-SAR, (IHS ou multiplicação), apresentou os melhores resultados. A integração via IHS permite mais opções de realce, enquanto que a multiplicação é de concepção e processamento mais simples. Os resultados da pesquisa são restritos ao SAR descendente, já que a integração TM/ SAR ascendente segue outra combinação de geometrias de iluminação, e seus resultados serão publicados oportunamente. Produtos resultantes destas técnicas devem ser usados com cautela, pois o sucesso da abordagem depende também da experiência do fotointérprete e do conhecimento do processo geológico focado

Referências

- Chavez Jr., J.P., Berlin, G.L., Sowers, L. B. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. **Journal of Applied Photographic Engineering**, 8: 23-30.
- Chavez Jr., J. P., Guphill, S. C., Howell, J. A. 1984. Image Processing Techniques for Thematic Mapper Data. In: ASP Conference, Washington, September, **Proceedings**, pp. 728-752.
- Chavez Jr., J. P., Kwarteng, A.Y. 1994 Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Vol. LV (3): 339-348.
- Harris, J. R. 1991. Mapping of regional Structure of Eastern Nova Scotia Using Remotely Sensed Imagery: Implications for Regional Tectonics and Gold Exploration, **Canadian Journal of Remote Sensing**, 17 (2): 122-135.

- Harris, J. R., Bowie, C. , Rencz, A. N., Graham, D. 1994. Computer-Enhancement Techniques for the Integration of Remotely Sensed, Geophysical, and Thematic Data for the Geosciences. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 20 (3) 210-221.
- Harris, J. R., Viljoen, D. W., Rencz, A. N. 1999. Integration and Visualization of Geoscience Data. In: **Remote Sensing for the Earth Sciences**, A. N. Rencz Ed., John Wiley & Sons, Am. Soc.. Phot. & R. S., Vol. 3, pp: 307-354.
- Lewis, A. J., Henderson, F. M., Holcomb, D. W. 1998. Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: **Principles & Applications of Imaging Radar**, F. M. Henderson & A. J. Lewis Eds.. John Wiley & Sons, Am. Soc. Phot. & R. S., Vol. 2, Chapter 3, pp: 131-181.
- Mason, P. J., Guo, L. J., Moore, M. 1994. Integration of LANDSAT TM with SPOT Panchromatic and ERS-1 SAR Imagery for Neotectonic Studies. In: Tenth Them. Conf. on Geol. R. S. , San Antonio, Texas, 9-12 May, **Proceedings**, Vol. I, pp: 253-262.
- Paradella, W. R., Silva, M. F. F., Rosa, N. A. 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM-Landsat and DEM data. **International Journal of Remote Sensing**, 15 (8): 1633-1648.
- Paradella, W. R., Bignelli, P. A., Veneziani, P., Pietsch, R. W. 1997. 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**, 18 (7): 1483-1501.
- Paradella, W. R., Santos, A. R., Dall`Agnol, R. Pietsch, R. W. 1998. 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**, 21 (4): 376-392.
- Paradella, W. R., Santos, A.R., Veneziani, P., Morais, M. C., Sant`Anna, M. V. 1999. Avaliação de Dados do RADARSAT-1 em Aplicação Geológica na Província Mineral dos Carajás. Relatório final, projeto FAPESP 97/10946-4, 131p.
- Paradella, W. R., Santos, A.R., Veneziani, P., Sant`Anna, M. V., Morais, M. C. 2000a. Geological Investigation Using RADARSAT-1 Images in the Tropical Rain Forest Environment of Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 26 (2): 82-90.
- Paradella, W. R., Santos, A.R., Veneziani, P., Morais, M.C. 2000b. Synthetic Aperture Radar for Geological Applicatiosn in the Moist Tropics: Experiences from the Brazilian Amazon Region. **Revista Brasileira de Geociências**, 30 (3): 543-538.
- Rheault, M., Simard, R., Garneau, C., Slaney, V. R. 1991. "SAR LANDSAT TM-Geophysical Data Integration Utility of Value-Added Products in Geological Exploration". **Canadian Journal of Remote Sensing**, 17(2): 185-190.
- Santos, A.R., Paradella, W. R., Veneziani, P., Morais, M. C. 1999. A Estereoscopia com Imagens RADARSAT-1: Uma Avaliação Geológica na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, 29 (4): 623-628.



Figura 1. Mapa geológico da área (Fontes: Paradella et al. 1998, Santos et al. 1999)

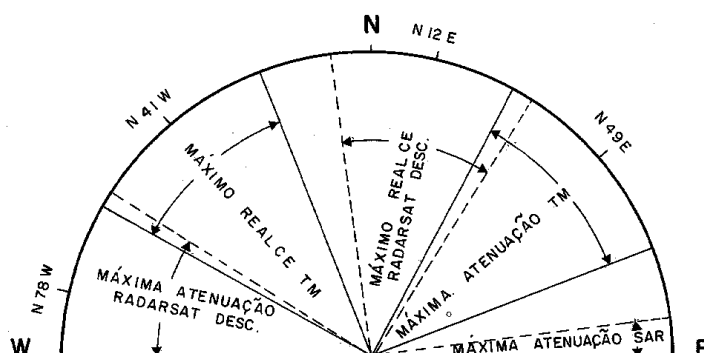


Figura 2. Esquemas de realce e atenuação de estruturas para o Standard (desc.) e TM.

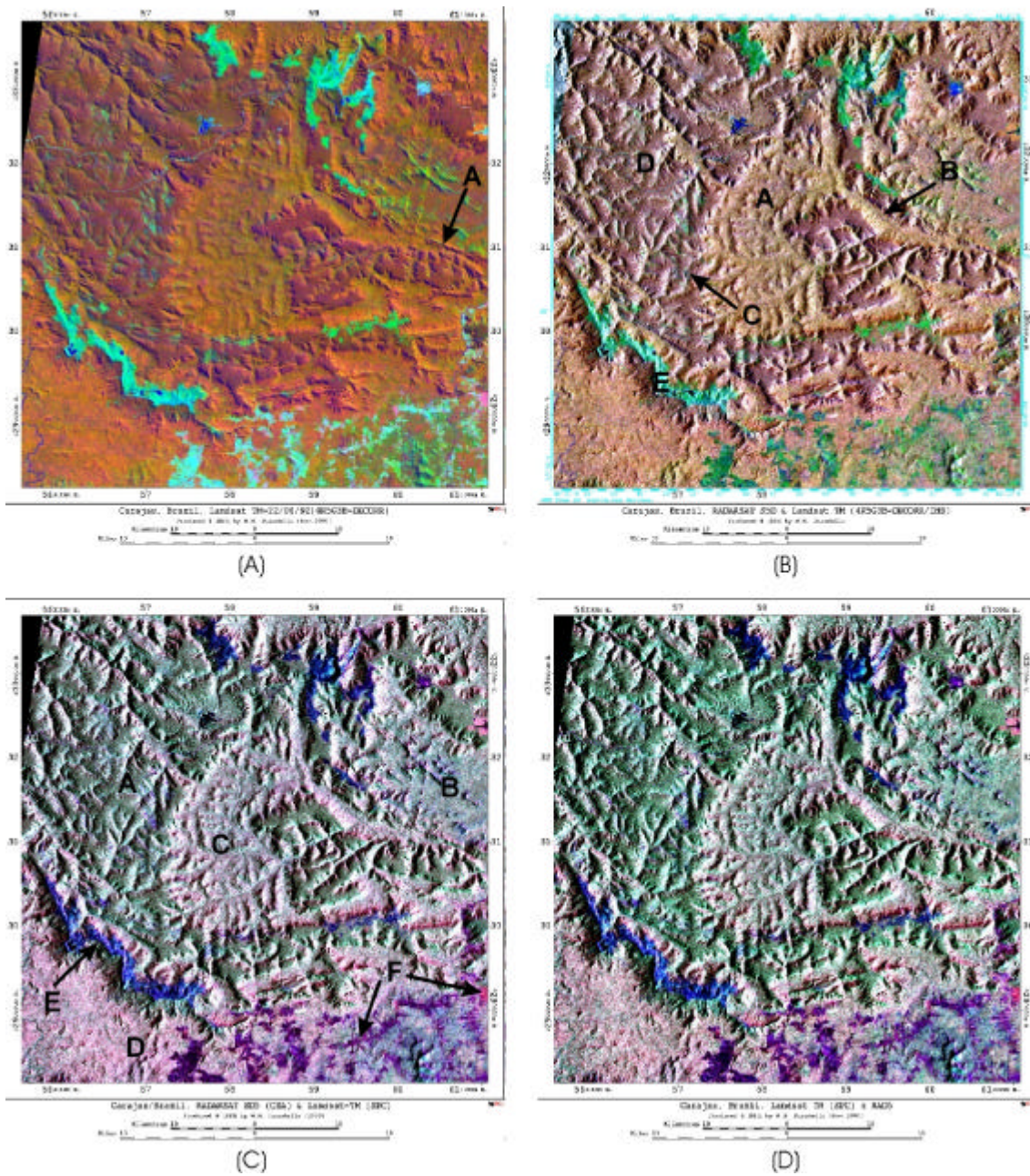


Figura 3: Composição TM 4R5G3B Decorrelacionada (A), Produto Integrado S5Desc/TM 4R5G3B (B), SPC-SAR via modelo IHS (C) e SPC-SAR via multiplicação (D).