

Avaliação das imagens multipolarizadas de simulação do MAPSAR para a interpretação visual e na discriminação das principais unidades litológicas do Vale do Rio Curaçá-BA.

Tiago Nunes Rabelo
Waldir Renato Paradella
Athos Ribeiro dos Santos
Camilo Daleles Rennó
Sheila Soraya Alves Knust

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil.
{tiago, waldir, camilo, athos, knust}@ltid.inpe.br

Abstract. In this work, the multipolarized images of MAPSAR simulation were evaluated for extraction of geologic information. The Curaçá River valley (BA) is an excellent area for this type of study, once it has a great lithological variability, dispersed caatinga vegetation and dominant plain relief. The information was extracted from visual analysis, with photointerpretation techniques, and from digital analysis, with the statistics evaluation of the amplitude of the signal scattering for the main lithological units. The results show that it's possible to approach the geological map of the area from the photointerpretation, and even add relative information to structural geology. For the separability of the main lithological units was concluded that as polarized components are added to the evaluation the separabilidade of the units increases and that between the three polarizations, VV presented greater separability.

Palavras-chave: MAPSAR, L band, multipolarization, visual interpretation, lithological discrimination, MAPSAR, banda L, multipolarização, interpretação visual, discriminação litológica.

1. Introdução

A simulação do satélite MAPSAR (**M**ulti-**A**pplication **P**urpose **S**intetic **A**pperture **R**adar) a partir do sensor aerotransportado SAR-R99B constitui uma importante fase do projeto de viabilidade em desenvolvimento entre o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e o DLR (Agência Aeroespacial da Alemanha). Tal simulação visa avaliar a aplicabilidade das imagens multipolarizadas, em banda L, com média resolução espacial e ângulos de incidência entre 45° (*near range*) e 53° (*far range*), em diversas áreas científicas, sendo que este trabalho busca uma avaliação preliminar para a aplicação geológica.

Duas classes de informações podem ser extraídas das imagens de radar para aplicação geológica. A primeira está relacionada às informações morfológicas, que são obtidas por análise visual e referem-se às feições topográficas, lineamentos, falhas, padrões de drenagem, vegetação e contatos de unidades geológicas. A segunda classe de informação consiste em avaliar o brilho das imagens de radar para a caracterização das propriedades da superfície. O brilho, em cada célula de resolução, é diretamente proporcional ao retroespalhamento do radar, que por sua vez é função da rugosidade superficial, declividade média e constante dielétrica. O uso dessa classe de informação requer um bom entendimento dos mecanismos de espalhamento superficial, especialmente relativo aos parâmetros do radar imageador (comprimento de onda, polarização e geometria do sistema).

A partir dos efeitos da rugosidade, declividade superficial e constante dielétrica, Daily et al (1978) desenvolveram cinco hipóteses sobre as respostas dos canais multipolarizados, que fornecem subsídios para a avaliação das imagens MAPSAR. As hipóteses indicam que: 1) a polarização cruzada é o melhor indicador da rugosidade média da superfície. As polarizações paralelas fornecem informações da rugosidade em uma escala aproximadamente igual ao comprimento de onda do SAR; 2) a razão dos canais VV e HH é pouco sensível a rugosidade superficial; 3) a razão dos canais VV e HV é pouco sensível à declividade no plano de incidência; 4) VV é pouco sensível à declividade na direção perpendicular ao plano de

incidência. HV é mais sensível á declividade nesta direção; 5) o canal HH é pouco sensível à variação da constante dielétrica na superfície, enquanto HV e VV são mais sensíveis.

O objetivo deste trabalho foi a avaliação visual e digital das imagens multipolarizadas de simulação do MAPSAR para extração de informações sobre as principais unidades litológicas da região do Vale do Rio Curaçá (BA).

2. Área de Estudo

A área teste localiza-se ao norte do estado da Bahia, próximo à divisa com o estado de Pernambuco, na porção norte do Vale do Rio Curaçá, **Figura 1**.

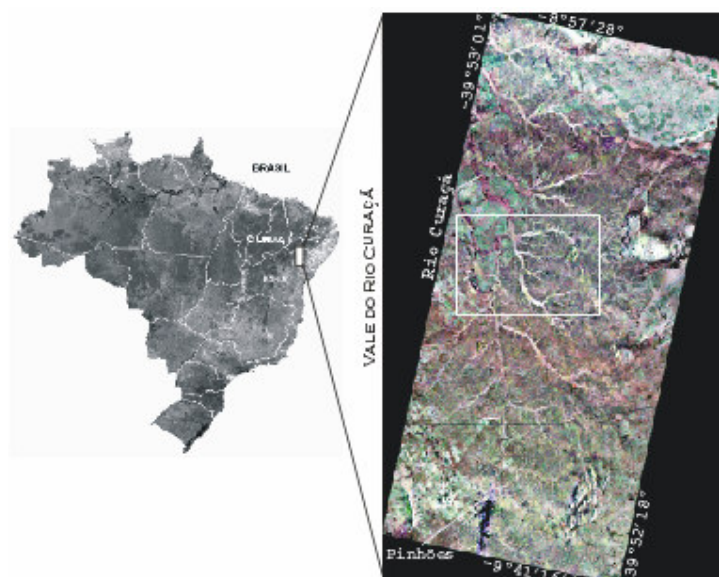


Figura 1 – Localização da área teste. Imagem de simulação do MAPSAR em composição colorida R-Lhh, G-Lvv, B-Lhv. Retângulo em branco indica a área enfatizada.

Regionalmente, a geologia do Vale do Rio Curaçá está inserida no embasamento norte do Cráton São Francisco, no extremo norte do cinturão Salvador-Curaçá. (Almeida, 1977). Especificamente na área teste, os mapas de reconhecimento geológico disponíveis foram cartografados em escala de semi-detalle (1:50000) por Delgado e Souza (1974). **Figura 2**. Segundo estes autores, parte da área é composta pelo Grupo Caraíba, de idade paleoproterozóica, de alto grau metamórfico, composto principalmente por migmatitos e gnaisses charnoquíticos pertencentes à Sequência Rio Curaçá, e por biotita gnaiss migmatizado, biotita-hornblenda gnaiss e quartzo-feldspato gnaiss pertencentes à Sequência Tanque Novo, além de associações máfico-ultramáficas e granitóides. A menor porção, mais a norte, é composta pelo Grupo Canudos, sobreposto ao Grupo Caraíba, de idade neoproterozóica, de baixo grau metamórfico, constituído por rochas metassedimentares, como mármore da Unidade Vermelhos e mica xistos da Unidade Veneza. A unidade máfico-ultramáfica é alvo de avaliação deste trabalho, individualizada principalmente nas ocorrências dos piroxenitos. Este litotipo é importante economicamente, pois é o hospedeiro da mineralização de cobre da região, contexto em que está localizado o depósito de cobre de Caraíba.

A região é favorável a avaliação de informações geológicas a partir de dados SAR, pois a variação litológica e seus produtos de alteração são bem expostos em superfície. A exposição destes materiais é resultante do clima semi-árido e da fitofisionomia da região, a qual predomina a caatinga, caracterizada por vegetação esparsa e solos pouco espessos (30 cm a

1,5 m). O relevo é predominantemente plano com solos que variam de arenosos a ricos em argilas e apresentam íntima relação com o substrato, (Paradella, 1995).

O terreno oriundo da área de domínio dos migmatitos e gnaisses é caracterizado por combissolos e luvisolos, relevo arrasado, fragmentos de rocha centimétricos e cobertura vegetal esparsa com 30% de recobrimento, **Figura 3A**. O terreno no domínio dos mica xistos e mármores são relativamente mais férteis e assim desenvolvem uma vegetação mais densa, com 85% de recobrimento, (Paradella, 1983), **Figura 3B**. As rochas máfico-ultramáficas geram vertissolos cinza escuros com fragmentos centimétricos de rocha e alto teor de argila, **Figura 3C**.

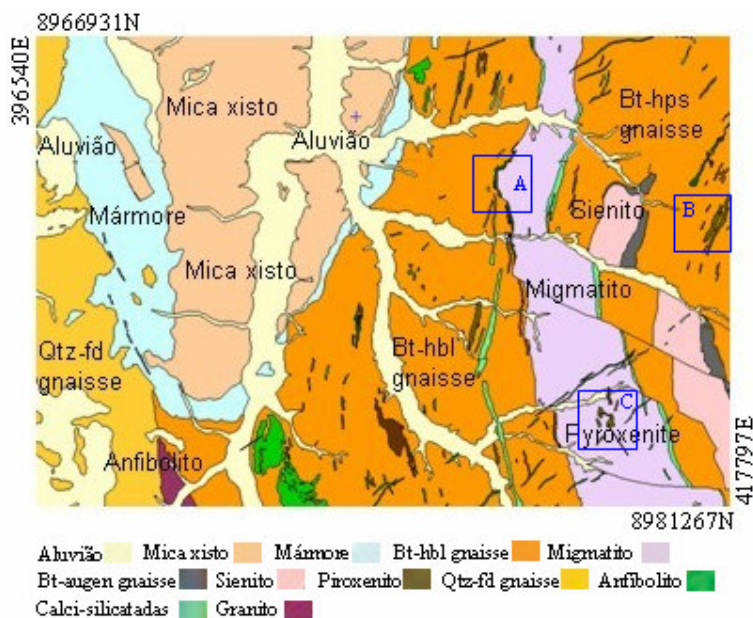


Figura 2 – Mapa litológico da área teste, região norte do Vale do Rio Curaçá. Os litotipos designados são os dominantes em cada unidade. As quadrículas em azul representam as principais ocorrências de piroxenito dentro dos limites das imagens. FONTE: Adaptado de Delgado e Souza (1974).



Figura 3 – A) Terrenos em relevos planos com abundantes fragmentos de rocha centimétricos e vegetação muito esparsa sobre gnaisses e migmatitos; B) Vegetação de caatinga densa sobre mica xisto e mármores; C) Vertissolo com fragmentos centimétricos de rochas e vegetação esparsa sobre os piroxenitos

3. Material e Métodos

As imagens de simulação MAPSAR foram projetadas em lat/long com Datum WGS-84 e apresentam as seguintes características: banda L – 23,9 cm; polarizações HH, VV e HV; ângulo de incidência entre 45° (*near range*) e 53° (*far range*); azimute de visada de 282° (simula a órbita descendente); resolução de 10 metros em “range” e 10 metros em azimute; 3 Looks.

Na primeira etapa, feições lineares e quebras de relevo foram extraídas das imagens pelo método sistemático de foto-interpretação, (Santos et al. 2001), a fim de se analisar os alinhamentos, frequência, tropia, homogeneidade e assimetria de drenagem e de relevo. As semelhanças entre as propriedades destes elementos combinado à variação do retroespalhamento caracterizaram as zonas homólogas, as quais são comparadas qualitativamente ao mapa geológico de Delgado e Souza (1974). As interpretações visuais foram feitas sobre a composição colorida Rhh-Gvv-Bhv. A comparação com o mapa geológico de Delgado e Souza (1974) seguiu dois critérios: um correspondente ao mapa estrutural e outro ao mapa litológico.

A segunda etapa avaliou-se os níveis digitais (amplitude) de cada canal polarizado, com a indicação em ordem decrescente de separabilidade de cada polarização. A separabilidade foi analisada segundo uma configuração par a par destes canais, também com a indicação do melhor par. Os três canais polarizados também foram avaliados em conjunto. A contribuição à separabilidade da classe piroxenito em relação às demais, utilizando-se 1, 2 ou 3 canais polarizados, foi estatisticamente analisada pela distância Jeffries-Matusita (distância JM), que é uma função critério utilizada para expressar as medidas estatísticas de separabilidade entre duas ou mais distribuições (Richards, 1993). A distância JM entre as classes x e k é dada por:

$$JM_{xk} = \sqrt{2(1 - e^{-B_{xk}})} \quad , \quad JM \in [0, \sqrt{2})$$

onde B_{xk} representa a distância de Bhattacharyya entre as classes x e k. A avaliação da significância dessa distância foi feita a partir de uma classificação por máxima verossimilhança gaussiana de amostras de treinamento e análise da matriz de confusão e os respectivos índices kappa.

Para a análise da separabilidade dos alvos geológicos, foram coletadas 11 amostras com dimensões de matrizes 7×7 pixels (exceto para a classe piroxenito – 3 matrizes 3×3) na maioria dos domínios litológicos correspondentes aos domínios apresentados no mapa da **Figura 2**. Dessa forma, as amostras representam a paisagem do terreno de onde foram coletadas, ou seja, associação rocha + solo + vegetação, **Figura 3**. Os seguintes domínios foram amostrados: mica xisto, mármore, biotita-hornblenda gnaiss (bt-hbl gnaiss), biotita-hiperstênio gnaiss (bt-hps gnaiss - segundo Paradella (1983)), quartzo-feldspato gnaiss (qtz-fd gnaiss), migmatito, sienito, aluvião, anfíbolitos e vegetação. A classe de vegetação verde foi coletada com base na imagem ETM+, da mesma época de aquisição.

4. Resultados e Discussões

4.1. Etapa I

A **Figura 4A**, **4B** e **4C** representam: as imagens multipolarizadas em composição colorida, o mapa estrutural e de zonas homólogas fotointerpretado sobre as imagens de simulação MAPSAR e o mapa geológico de Delgado e Souza (1974), respectivamente.

Com relação às estruturas, a maior contribuição foi atribuída a notável foliação de direção NE-SW na porção centro-leste da **Figura 4B** (tracejado em vermelho). Esta foliação foi confirmada por medidas de campo, **Figura 4C**, e parece ser a principal foliação regional. As demais estruturas interpretadas (falhas e fraturas indefinidas) coincidem com três direções principais, uma segundo a direção NEN-SWS, outra segundo a direção NW-SE, e outra segundo a direção NE-SW, inclusive com indicação de movimentos relativos. Estas estruturas não são bem definidas em relação às estruturas já mapeadas, **Figura 4C**. Uma interpretação regional seria necessária para que se possa indicar as principais estruturas regionais e o possível modelo tectônico da região.

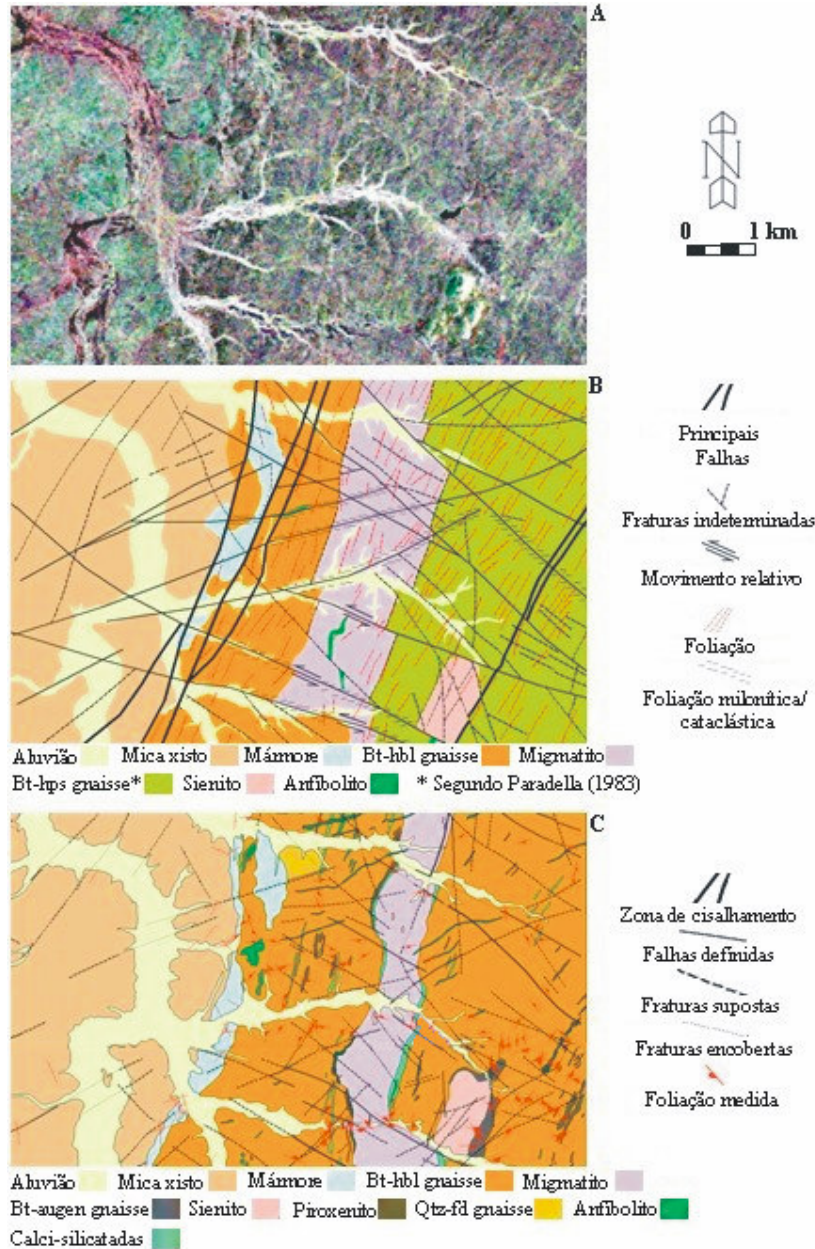


Figura 4 – A) Imagem de simulação MAPSAR em composição colorida Rhh Gvv Bhv, base para fotointerpretação. B) Mapa de estruturas e zonas homólogas fotointerpretado com a correlação dos litotipos cartografados. C) Mapa geológico de referência cartografado por Delgado e Souza (1974).

As principais unidades mapeadas têm correspondência às zonas homólogas obtidas, porém os contatos das unidades mármore e migmatito apresentam uma pequena diferença em relação ao mapa de referência, o primeiro com a ocorrência mais restrita e o segundo significativamente mais espesso, **Figura 4B e C**. A classe do biotita-hiperstênio gnaisse, apresentada na **Figura 4B**, foi assim caracterizada com base no trabalho de Paradella (1983), já que esta unidade não é reconhecida por Delgado e Souza (1974), **Figura 4C**.

4.2. Etapa II

As imagens de cada componente polarizado e a composição colorida RGB entre estes são apresentadas na **Figura 5**. Ao observar cada componente isoladamente é difícil apontar, visualmente, grandes diferenças entre as repostas de cada polarização. Para exemplificar, aparentemente todas têm um alto retroespalhamento para a vegetação, representada nas imagens pela cor branca ao logo das drenagens, assim como todas as imagens mostram um baixo sinal de retorno, cor escura, para superfícies arenosas sem vegetação, como é o caso dos aluviões em determinados segmentos das drenagens, **Figura 5A,B,C**. Porém a composição colorida entre as três componentes identifica diferenças significativas do espalhamento de um mesmo alvo geológico entre um e outro componente polarizado, sendo demonstrado pela alta variação de cores e brilho na cena, **Figura 5D**.

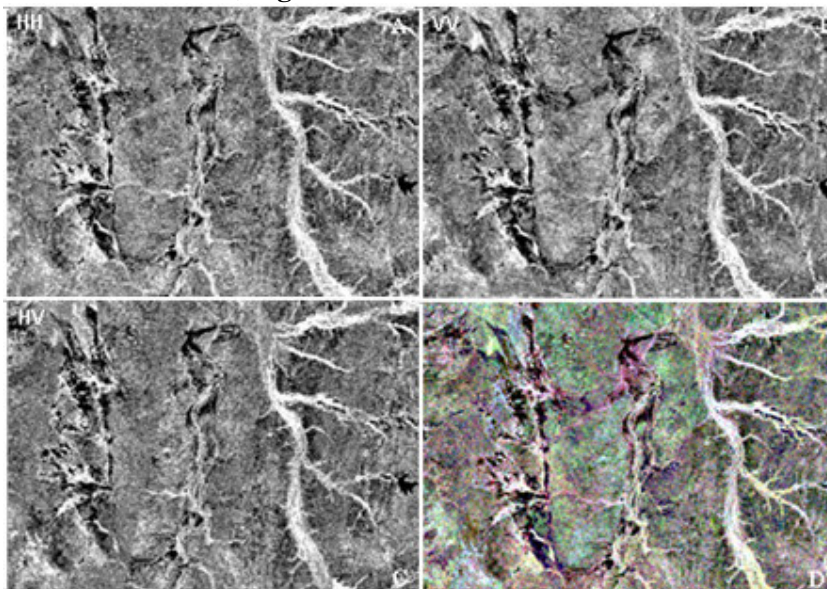


Figura 5 – Imagens de simulação MAPSAR nas polarizações Lhh (A), Lvv (B) e Lhv (C) e a composição colorida R-Lhh G-Lvv B-Lhv (D) com detalhe da subárea selecionada para avaliação. Escala aproximada – 1:200.000

As distribuições das amostras do retroespalhamento entre as componentes polarizadas apresentam uma alta correlação linear, **Figura 6A**. A distribuição com maior retroespalhamento nas três polarizações é do domínio do sienito, cujo espalhamento é dominado pela macrotopografia. Os demais domínios, que estão sobre relevo relativamente plano, têm suas respostas dominadas pela microtopografia ou rugosidade superficial.

Desconsiderando o domínio do sienito, a distribuição de maior amplitude é a da vegetação, seguido dos domínios, em ordem decrescente, dos piroxenitos e anfibolitos, do mármore, de um aglomerado entre mica xisto, quartzo-feldspato gnaisse e biotita-hornblenda gnaisse, de um segundo aglomerado entre biotita-hiperstênio gnaisse e migmatito e, com menor amplitude nos três eixos, segue o domínio do aluvião.

A avaliação da separabilidade entre as classes para cada polarização teve como foco a relação entre o domínio do piroxenito e os demais domínios. A distância JM média permitiu a seguinte classificação em ordem decrescente de separabilidade: a polarização VV apresenta a maior separabilidade média com $JM = 1,272$; a polarização HH apresenta a segunda melhor separabilidade, com $JM = 1,137$; a polarização com menor separabilidade média foi a HV com $JM = 1,093$. Este resultado confirma a teoria de Daily et al. (1978), de que a polarização paralela é mais sensível à rugosidade superficial, enquanto a cruzada é mais sensível à declividade, que neste caso é muito pequena.

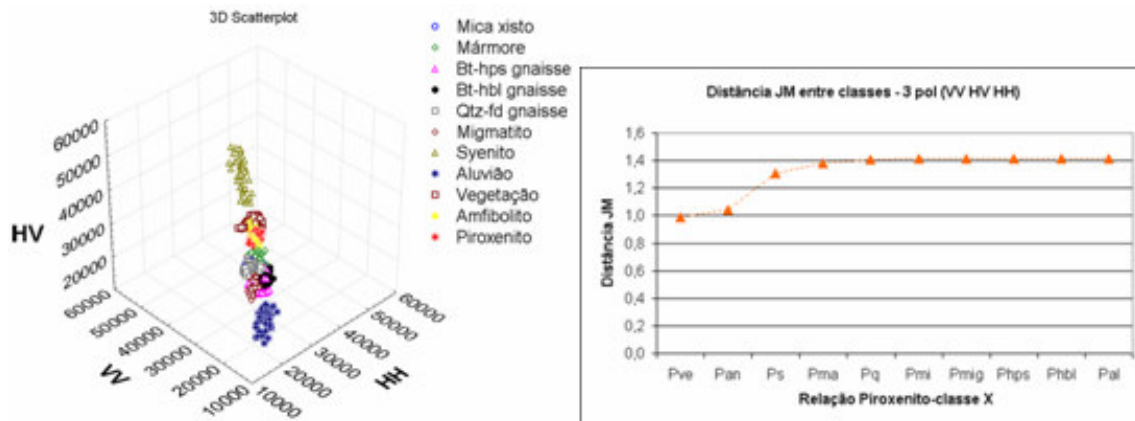


Figura 6 – A) Gráfico 3D da distribuição das amostras de amplitude dos principais domínios mapeados nas três componentes polarizadas. **B)** Distância JM entre a classe piroxenito e as demais classes considerando-se as 3. Siglas: **Pmi** - Piroxenito x mica xisto; **Pma** - piroxenito x mármore; **Pmig** - piroxenito x migmatito; **Pq** - piroxenito x qtz-fd gnaisse; **Phps** - piroxenito x bt-hps gnaisse; **Phbl** – piroxenito x bt-hbl gnaisse; **Pal** - piroxenito x aluvião; **Pan** - piroxenito x anfibolito; **Ps** – piroxenito x sienito.

Considerando-se dois canais polarizados, o par polarizado VV e HV obteve maior separabilidade, com distância JM média = 1,302, seguido do par HH e VV com distância JM média = 1,291 e do par HH e HV com distância JM média = 1,206. Apesar de o canal HV ser o pior na separabilidade individual, em conjunto com o canal VV passa a ser o melhor par polarizado na separabilidade dos alvos em questão. A mesma análise de separabilidade foi feita para o conjunto das três polarizações, em que a distância JM média entre o piroxenito e as demais classes em estudo foi de 1,32 e as classes que são estatisticamente mais próximas do piroxenito são a vegetação e anfibolito, **Figura 6B**. Observa-se assim que, a separabilidade aumenta à medida que se acrescentam canais polarizados na investigação.

A fim de verificar se esse aumento relativo é ou não significativo, foi gerada uma classificação com amostras extras de treinamento para obtenção de uma matriz de confusão e seu respectivo valor kappa para o canal VV (melhor separabilidade individual), para o par VV e HV (melhor separabilidade entre pares de polarização) e para o conjunto das três polarizações. Os kappas resultantes e respectivas variâncias foram: VV – 0,36 (var. 0,0013), VV e HV – 0,51 (var. 0,001) e HH, VV e HV – 0,67 (var. 0,001).

A significância dos kappas foi avaliada a partir do teste de hipótese Z, onde a hipótese nula representou a igualdade dos kappas, o teste segue a função:

$$\text{Teste Z} = (\text{kappa 2} - \text{kappa 1}) / \text{RAIZ}(\text{var}_2 + \text{var}_1)$$

Para a rejeição da hipótese nula o valor do Z teria de ser maior que 1,96, para 95% de confiança. O valor de Z para comparação entre os Kappas 1 e 2 foi de 3,12 e entre os kappas 2 e 3 foi de 3,57, dessa forma, em ambos os casos o teste rejeita a hipótese de igualdade dos kappas. Assim a configuração VV HH e HV é significativamente melhor que o par VV e HV, que por sua vez é significativamente melhor que VV apenas.

A consistência destes dados foi verificada com a aplicação de uma classificação supervisionada de maxiverosimilhança para toda a imagem, a partir das amostras coletadas. Na classificação foi enfocada apenas a classe piroxenito, todas as demais foram consideradas como uma única classe (não-piroxenito), **Figura 7**. As classes de menor distância JM (**Figura 6B**) e de maior confusão com o piroxenito foram as classes vegetação e anfibolito, **Figura 7A** e **C**, onde a área de ocorrência de vegetação foi classificada como sendo de piroxenito. Algumas áreas mapeadas como piroxenitos não foram classificadas totalmente como tal, como é exemplificado no círculo da **Figura 7C**, porém a maioria das ocorrências foi identificada na classificação.

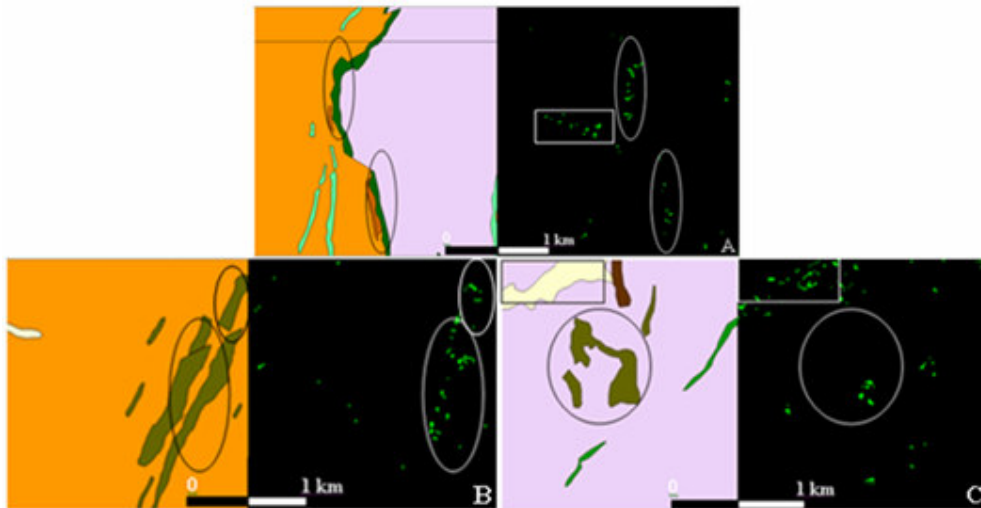


Figura 7 – Detalhe do resultado da classificação à direita e o mapa geológico à esquerda com as principais ocorrências do piroxenito. Nota-se em A que há confusão com a vegetação (retângulo) e que em A, B e C os corpos do piroxenito foram classificados como tal, mas não completamente identificados (elipses). As áreas A, B e C estão identificadas na Figura 2 com quadrículas em azul.

5. Conclusões

As imagens de simulação do MAPSAR multipolarizadas apresentam um potencial significativo para investigação de alvos geológicos. Para a interpretação visual, além de uma melhor definição daquelas estruturas já mapeadas, foi possível observar uma importante direção de foliação (NE-SW) que é corroborada no mapa geológico por medidas de campo, além disso, as principais unidades litológicas mapeadas correspondem às zonas homólogas identificadas. Apesar da alta correlação entre os canais originais, cada polarização tem sua particularidade na caracterização das unidades geológicas, ou seja, com aumento do número de canais polarizados aumenta também a capacidade de se separar as unidades existentes.

6. Referências

- Almeida, F.F.M. O Cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 7, p. 349-364, 1977.
- Daily, M.; Elachi, C.; Farr, T.; Stronberg, W.; Williams, S.; Schaber, G. **Application of Multispectral Radar and Landsat Imagery to Geologic Mapping in Death Valley**, NASAJPL, JPL pub. 78-19, 47 p. 1978.
- Delgado, I. M. e Souza, J.D. **Curaçá (BA); Barro Vermelho (BA)**: SC.24-V-D-II-1; SC.24-V-D-II-3; Salvador, 1974. Mapa Geológico. Escala 1:50.000.
- Paradella, W.R. Discriminação de unidades litológicas no Baixo Vale do Rio Curaçá (Bahia) através de realces por processamento digital de dados MSS-Landsat 3. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Brasil, 107 p. 1983.
- Paradella, W.R.; Vitorello, I. Geobotanical and soil spectral investigation in the “Caatinga” environment (Brazil) base on multitemporal remote sensing data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.21 (1), pp. 52-59, 1995.
- Richards, J. A. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. New York, Inc: Springer-Verlag, v. 2, 1993. 340 p.
- Santos, A.R.; Veneziani, P.; Paradella, W.R.; Morais, M.C. “Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: Aplicações.” Curso INPE-ADIMB, São José dos Campos, 21-26 de Agosto de 2000. São José dos Campos, INPE, 2001, 103p (INPE-8117-PUD/45)
- Teixeira, W.; Sabaté, P.; Barbosa, J.; Noce, C.M.; e Carneiro, M.A. Archean and Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: Cordani, U.G.; Milani, E.J; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A. **Tectonic Evolution of South America**. XXXI International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 101-137, 2000.