

## AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE ATRIBUTOS ESPECTRAIS DE IMAGENS DIGITAIS MSS-LANDSAT EM DISCRIMINAÇÕES LITOLÓGICAS NO BAIXO VALE DO RIO CURAÇÁ, BA

WALDIR RENATO PARADELLA

Instituto de Pesquisas Espaciais — INPE — Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq  
C.P. 515 — 12200 — São José dos Campos — SP — Brasil

The use of spectral attributes criteria was investigated, based on measures of statistical distance of separability between thematic classes in MSS digital LANDSAT imagery, in order to select the best subsets of channels in composite colors for the detection and discrimination of lithological units in the lower Valley of Curaçá River, State of Bahia. Two selection criteria were used based on representative sampling pixels of thematic classes related to lithologic units: a) maximization of the average distance among the  $JM^2$  Distance for all pairs of classes, b) maximization of minimum  $JM^2$  Distance among the pairs of classes. The analysis was restricted only to digital MSS data from the dry season and three situations were investigated: a) selection of the three best channels, considering the four original channels (channels 4, 5, 6 and 7); b) selection of the three best channels, considering the six MSS ratios (channels 4/5, 4/6, 4/7, 5/6, 5/7 and 6/7); and c) selection of the three best channels in a hybrid approach (the four original channels and the six ratios). A visual analysis was done on color composite images using the selected sets and based on detection and discrimination indices of ranking. The research showed that the hybrid product (channels 4, 5/7 and 7 with green, blue and red, respectively) and the Normal Color Composite (channels, 4, 5 and 7 with blue, green and red colors, respectively) had the best performance. The ratio products, on the other hand presented great ambiguities.

### INTRODUÇÃO

Composições coloridas de imagens MSS do satélite LANDSAT<sup>1</sup> têm sido usadas com freqüência em trabalhos de fotointerpretação geológica, em especial em discriminações litológicas. A técnica é relativamente simples e consiste na associação das cores primárias (azul, verde e vermelha) a três dos quatro canais disponíveis originalmente (MSS 4, MSS 5, MSS 6, MSS 7), ou suas transformações (MSS 4/5; MSS 4/6; MSS 4/7; MSS 5/6; MSS 5/7; MSS 6/7; 1º, 2º e 3º Componentes Principais, etc.). O sucesso deste procedimento está na facilidade de visualização, em um único produto, das variações de reflectância do terreno, através das nuances e gradações tonais registradas na composição colorida. Isto, entretanto, implica um compromisso evidente entre os canais selecionados para a composição colorida e o resultado conseguido na interpretação visual.

Obviamente, o ideal para assegurar que a interpretação final tenha sido fundamentada nas informações contidas em todos os canais disponíveis seria, naturalmente, analisar todas as combinações de canais possíveis. Isto, de certa forma, é impraticável pelo custo computacional envolvido em gerar e documentar todas as composições e pelo tempo de análise visual requerido.

Como exemplo, considere-se que o número de interações necessárias na escolha dos três melhores canais para composições coloridas, à partir dos seis produtos de divisões de canais ("ratios"<sup>2</sup>) do MSS/LANDSAT, seja dado pela relação:

$$\binom{N}{n} \triangleq \frac{N!}{n!(N-n)!},$$

onde:

$N$  = população dos canais originais (canais 4/5, 4/6, 4/7, 5/6, 5/7, 6/7),

$n$  = subconjunto requerido,

ou

$$\binom{6}{3} = \frac{6!}{3!(6-3)!} = 20 \text{ interações.}$$

Isto produz 20 interações possíveis dos canais originais sem o uso de permutações inversas. É óbvio que o processo de análise visual e a extração desta quantidade de informação torna-se inviável e ineficiente. Além do mais, muitas destas imagens seriam provavelmente redundantes (Podwysochi et alii, 1977).

<sup>1</sup> Detalhes sobre o Programa LANDSAT podem ser vistos no trabalho de Paradella & Vitorello, 1982.

<sup>2</sup> Imagens resultante da divisão digital entre bandas, ponto à ponto. O algoritmo usado nesta transformação é  $L_s = \frac{L_1}{L_2} + b$ , onde  $L_s$  = valor digital do "pixel" ou elemento básico de informação da imagem resultante,  $L_1$  e  $L_2$  são os valores nos dois canais envolvidos na divisão, e  $a$  e  $b$  são fornecidos pelo usuário definindo ganho e "offset".

A alternativa investigada na pesquisa baseou-se na utilização de critérios de seleção de atributos espectrais, a partir de medidas de distâncias de separabilidade entre classes, visando a indicação de subconjuntos de canais para composições coloridas que melhor discriminassem diferentes litologias presentes em uma área de 800 km<sup>2</sup> no Baixo Vale do Rio Curaçá, BA.

Vários são os critérios de medidas de distâncias estatísticas disponíveis na literatura, destacando-se a Divergência, a Divergência Transformada, a Distância de Battacharaya e a Distância de Jeffreys-Matusita (JM), entre outras. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser vistos nos trabalhos de Swain & King (1973).

Swain & King (1973) concluíram que o critério da Distância JM apresenta algumas vantagens em relação aos outros critérios na previsão correta de melhores canais para reconhecimento multiclases. Pormenores sobre a utilização de critérios de seleção de atributos de canais MSS/LANDSAT podem ser encontrados nos trabalhos de Dutra (1982) e Li et alii (1982).

### Fundamentação Teórica

De modo genérico, cada classe temática em uma imagem (por exemplo, a classe anfibólito) pode ser caracterizada por uma função densidade de probabilidade  $p(x/\omega_i)^1$ , assumindo condições de distribuição gaussiana dos níveis de cinza (valores digitais) que representam a classe.

Para o caso de uma dimensão ou banda, a função densidade de probabilidade é dada, segundo Swain (1978), por:

$$p(x/\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \cdot \sigma_i} \exp. \left[ -\frac{1}{2} \cdot \frac{(x-\mu_i)^2}{\sigma_i^2} \right],$$

onde:

- exp. = e (base dos logaritmos naturais) elevado a potência indicada,
- $\mu_i$  = média ou valor médio dos níveis de cinza para a classe,
- $\sigma_i^2$  = variância das medidas na classe.

Na prática,  $\mu_i$  e  $\sigma_i^2$  são estimadas por amostragens.

No caso de dois ou mais canais, a função densidade normal multivariada pode ser estimada através dos valores de média e matrizes de covariância para as classes envolvidas, pela equação:

$$p(x/\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \cdot |\Sigma_i|^{1/2}} \exp. \left[ -1/2 \cdot (x-\mu_i)^T \cdot \Sigma_i^{-1} (x-\mu_i) \right],$$

<sup>1</sup>  $p(x/\omega_i)$  = denota a distribuição dos "pixels" x pertencentes à classe  $\omega_i$

onde:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad \mu_i = \begin{bmatrix} \mu_{i1} \\ \mu_{i2} \\ \vdots \\ \mu_{in} \end{bmatrix} \quad \Sigma_i = \begin{bmatrix} \sigma_{i11} & \sigma_{i12} & \dots & \sigma_{i1n} \\ \sigma_{i21} & \sigma_{i22} & \dots & \sigma_{i2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{in1} & \sigma_{in2} & \dots & \sigma_{inm} \end{bmatrix}$$

ou:

- x = vetor dado (valores de cinza da classe nos canais 1, 2... n),
- $\mu_i$  = vetor média (valores de média da classe  $\omega_i$  nos canais 1, 2, ... n),
- $\Sigma_i$  = matriz de covariância para a classe  $\omega_i$ , sendo  $\sigma_{i21}$  a covariância entre os canais 2 e 1 para a classe,
- $|\Sigma_i|$  = determinante da matriz de covariância  $\Sigma_i$ ,
- $\Sigma_i^{-1}$  = inversa de  $\Sigma_i$ ,
- $(x-\mu_i)^T$  = transposta do vetor  $(x-\mu_i)$ .

Na prática os vetores média e matriz de covariância para cada classe são estimados por amostragens.

A Distância JM está vinculada ao produto das funções densidade de probabilidade de classes pela relação:

$$d_{JM^2_{ij}} = 2(1-p),$$

onde:

$$p = \int_{-\infty}^{+\infty} (p(x/\omega_i) \cdot p(x/\omega_j))^{1/2} dx.$$

Generalizando, a Distância JM é uma medida da separabilidade média entre duas funções densidade de probabilidade, onde para duas classes,  $\omega_i$  e  $\omega_j$ , o produto integrado das funções densidade de probabilidade de  $\omega_i$  e  $\omega_j$  será proporcionalmente maior, à medida que as duas funções se superponham e diminuem a separabilidade entre classes. Os casos extremos em tal raciocínio seriam: 1)  $p(x/\omega_i) = p(x/\omega_j)$ ;  $\omega_i = \omega_j$ , i.e., as classes não se separariam onde  $d_{JM^2} = 0$ , e 2) quando as classes estivessem bem separadas e  $d_{JM^2}$  tenderia a 2,0.

Neste esquema, quando se dispõe de duas classes e M canais, a seleção do melhor conjunto n de M, no qual a separabilidade entre as duas classes é máxima, é baseada na escolha dos n canais de M para os quais a Distância JM<sup>2</sup> é maior. Quando se defronta com mais de duas classes e M canais, costuma-se utilizar dois critérios seletivos para a escolha do subconjunto n: 1) um subconjunto n será escolhido, no qual a distância média entre as Distâncias JM<sup>2</sup>, para todos os pares de classes, é maximizada e 2) será considerado o subconjunto n, que contenha a maior das Distâncias JM<sup>2</sup> mínimas entre os pares de classes.



## A Área de Estudo

A área teste escolhida está situada no Baixo Vale do Rio Curaçá, no nordeste da Bahia, com extensão aproximada de 800 km<sup>2</sup> e compõe um domínio pediplanizado, de clima semi-árido. A densidade de afloramentos é baixa e os solos refletem com freqüência as rochas subjacentes. Paradella (1983) reconhece 5 grandes grupos de solos na área, vinculados ao substrato litológico: Bruno Não-Cálcicos (gnaisses, granulitos/migmatitos), Planossolos (gnaisses félsicos, micaxistos), Latossolos (calcários, mármore), Litólicos/Cambissolos Litólicos (filitos/filitos-carbonáticos) e Vertissolos (metamafitos/metaultramafitos). A vegetação na região é marcada por espécies de caatinga, predominantemente caducifólias, sendo observados certos controles geobotânicos representados por seletividade de flora e variações de densidade de cobertura vegetal em relação ao substrato rochoso (Paradella, 1983).

No contexto geotectônico, a região Pré-cambriana nordeste da Bahia é caracterizada por um cinturão móvel, com marcante tendência de foliação N-S, desenvolvido principalmente durante o Proterozóico Inferior, na borda oriental do suposto craton arqueano do Paramirim (Almeida, 1981). O Vale do Curaçá inclui partes desta faixa móvel e áreas arqueanas gnaissicas-granulíticas, estratigraficamente

conhecidas como Super-Grupo Caraíba (Ladeira & Brockes Jr., 1969), ou Complexo Caraíba (Jardim de Sá et alii, 1976). Tal domínio, denotando estruturas Pré-Brasilianas, é cruzado transversalmente no NNE da região por seqüências supracrustais, deformadas e metamorfisadas, em menor grau metamórfico, durante o evento Brasileiro, constituindo a parte ocidental do Sistema de Dobramentos Sergipano, inserido na Província Borborema (Almeida et alii, 1981).

Do ponto de vista litológico, a área teste é constituída em grande parte por unidades granulíticas (biotita-hiperstênio gnaisses), migmatíticas (estruturas "stromatic" e "folded") e gnaissicas (biotita-gnaisses, quartzo-feldspato gnaisses, quartzo-feldspato granada-gnaisses), com variadas intercalações de corpos descontínuos de cálcico-silicatadas, metamafitos/metaultramafitos e lentes de quartzitos ferruginosos. Um sienito intrusivo constitui a Serra Redonda, bordada por faixa de cataclasitos e augen-gnaisses. Sobreposta discordantemente a estas unidades, uma seqüência metasedimentar, de baixo grau metamórfico, ocorre representada por filitos, micaxistos, mármore e metacalcários (Jordan, 1968; Delgado & Souza, 1975; Paradella, 1983). A Fig. 1 sintetiza a distribuição espacial das unidades litológicas na área que serve de referência para os propósitos da pesquisa.

Todo o processamento digital de imagens foi desen-

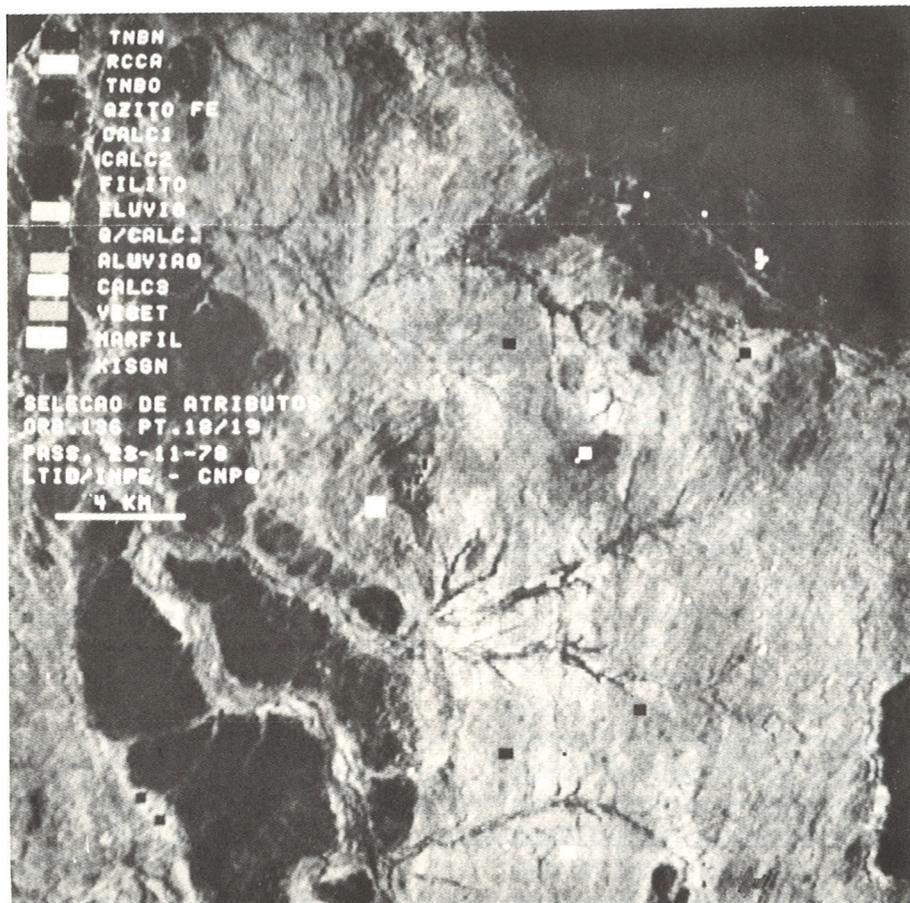


Figura 2 — Localização das 14 classes temáticas, com suas respectivas áreas de amostragens para o teste de seleção de atributos com o programa SELATR.

volvido pelo autor no L.T.I.D. (Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais) do INPE/CNPq, em São José dos Campos/SP, utilizando o Analisador GE-Image-100, com um

computador PDP 11/45 (General Electric, 1975). A análise se restringiu a fitas magnéticas da época seca (23/nov/1978) com 54° de elevação e 112° de Azimute solares.

Tabela 1 — Dados relativos às classes temáticas utilizadas no teste com o sistema SELATR

Classe Temática	Associação litológica correspondente	Condições superficiais. Estimativa de recobrimento através da sombra da copa vegetal (com folhagem), relativa a área de 0,62 ha ("pixel"). Estimativas de recolhimento do solo por fragmentos de rochas. % (Tabela de Folk, 1951).
TNBN	biotita-gnaísses; biotita-hiperstênio-gnaísses; biotita-hornblenda-gnaísses, constantes intercalações de máficas/ultramáficas.	Vegetação caducifólia (Catingueiras e Pereiros predominantemente) = 10 a 30%. Solos residuais (Bruno Não-Cálcico Vértico predominante) com 30% de blocos de rochas e fragmentos de quartzo.
TNBO	quartzo-feldspato gnaísses, quartzo-granada gnaísses	Vegetação caducifólia (Catingueiras e Pereiros) = 30%. Solos residuais (Planossolo Vértico predominante). Blocos de rochas = quase ausente.
RCCa	migmatitos estromáticos, migmatitos "folded", granitóides	Vegetação caducifólia (Catingueiras e Pereiros) = 10 a 30%. Solos residuais (Bruno Não-Cálcico Vértico Planossólico, Bruno Não-Cálcico Planossólico Vértico, Bruno Não-Cálcico Orto) com 30% de blocos de rochas. Fragmentos de quartzo.
QTZITO FE	quartzito ferruginoso (lentes)	Vegetação ausente. Material residual oxidado mais fragmentos de rochas.
CALC 1	calcário secundário (Fm. Caatinga)	Vegetação caducifólia (marmeleiros e catingueiras) = 60%. Substrato com blocos cinzentos escuros (placas) de calcários secundário com muito pouca quantidade de fragmentos de quartzo.
CALC 2	mármore; calcários metamórfico	Solo (Latosolo Amarelo Eutrófico) exposto, sem vegetação.
CALC 3	mármore	Lajedos extensos de mármore cinzentos.
FILITO	filitos	Solo (Litólico) residual do filito com pequenas plaquetas de material pelítico, ausência de vegetação.
ELÚVIOS	depósitos de eluvios arenosos grosseiros	Exposição de seixos arredondados escuros de quartzo (predominantes), com alguns fragmentos de rochas. Ausência de vegetação.
Q/CALC	cobertura quarternária calcífera	Solo exposto de caliche (precipitado de carbonatos, argilo minerais e matéria orgânica). Ausência de vegetação.
MARFIL	filitos predominantes; mármore intercalados	Vegetação caducifólia (Catingueiras, Quebra-facas, Marmeleiros) = 60 a 80%. Solos (Planossolo) capeados por fragmentos de rochas e seixos de quartzo tingidos por óxido de ferro.
XISGN	micaxistos granatíferos predominantes; gnaísses (baixo grau)	Vegetação caducifólia (Carquejas, Juremas, Catingueiras, Faixeiros e Quebra-facas) = 80 a 90%. Solos (Planossolo) capeados por fragmentos de rochas (predominantes) e seixos de quartzo com óxidos de ferro.
ALUVIÃO	depósitos aluvionares nas calhas de drenagens	Solos arenosos mais matações de rochas, sem vegetação.
VEGET.	depósitos aluvionares nas calhas de drenagens	Vegetação perene-fólia (Juazeiros, Catingueiras) predominantes. Quase ausência de exposição de solo.

## RESULTADOS

Na Fig. 2 são mostradas as localizações de áreas de amostragens para 14 classes temáticas do Baixo Vale do Curaçá. A escolha deste número de classes foi determinada pelas limitações atuais do Sistema SELATR — Seleção de Atributos (Ribeiro et alii, 1982), que comporta no máximo 15 classes e 50 áreas de amostragens para a estimativa dos parâmetros de cada classe. Na Tabela 1 são indicadas as características superficiais para as áreas de amostragens das classes, relativas à verificação de campo efetuada em Dez/Jan. de 1982, i.é, época chuvosa. Neste aspecto, convém salientar que a influência da cobertura vegetal nas imagens do período seco deve ser bem mais atenuada face a ausência de biomassa verde, principal causa do mascaramento das respostas espectrais diagnósticas de solos e rochas, na porção visível e infravermelho próximo de atuação do MSS/LANDSAT (Siegal & Goetz, 1977).

Dois cuidados importantes foram tomados na escolha destas amostras. A fim de evitar casos em que a matriz de covariância possa ser singular (seu determinante = zero e sua inversa não possa ser calculada, tornando o cálculo computacional impossível), é necessário que um número mínimo de pontos de amostragens das classes seja estabelecido e rigorosamente seguido. Segundo Swain (1978), este valor na prática pode ser dado por  $10n$ , sendo  $n$  o número de canais ou dimensões envolvidas. Na pesquisa, foi utilizado um número mínimo de 40 pontos de amostragem para cada classe, portanto, acima dos 30 pontos mínimos recomendados para a escolha de 3 canais para composições coloridas, usando-se as cores primárias. Esta imposição inviabilizou, entretanto, a amostragem de alvos com dimensões reduzidas como, por exemplo, corpos de mafitos-ultramafitos e cálcico-silicatados.

O segundo cuidado tomado, esteve ligado à obrigatoriedade de não se violar a suposição inerente ao comportamento gaussiano dos níveis de brilho para as classes, assumido no uso da seleção de atributos. Neste sentido, analisou-se a distribuição de freqüências dos "pixels" das amostragens de classe temática, em cada uma das 10 situações consideradas, i.é, canais MSS 4, 5, 6, 7, 4/5, 4/6, 4/7, 5/6, 5/7, 6/7, a fim de assegurar a presença de distribuições normais nos dados de entrada do sistema SELATR.

A análise ateu-se aos dados MSS/LANDSAT da estação seca, sendo investigadas três situações: a) seleção dos três melhores canais, considerando os canais 4, 5, 6 e 7; b) seleção dos três melhores canais, considerando os produtos de divisões (canais 4/5, 4/6, 4/7, 5/6, 5/7, e 6/7); e c) seleção dos três melhores canais, considerando os canais originais e as divisões de canais (4, 5, 6, 7, 4/5, 4/6, 4/7, 5/6, 5/7 e 6/7).

Para cada conjunto selecionado, foram construídas composições coloridas com as 3 cores primárias no vídeo de TV do GE Image-100 e documentadas fotograficamente. Os

produtos obtidos tiveram seus desempenhos visualmente avaliados em discriminações das litologias realçadas. Nas Tabelas 2, 3 e 4 são apresentados os resultados fornecidos pelo sistema SELATR para as situações investigadas.

Pela Tabela 2, nota-se que a escolha dos três melhores canais, entre os quatro originais, apenas mostrou discrepância nos canais do infravermelho (canais 6 e 7), sendo que pelo primeiro critério  $JM^2$  foi indicado o canal MSS 7, enquanto pelo segundo critério  $JM^2$  a escolha recaiu no canal MSS 6.

A composição falsa-cor, normalmente usada em trabalhos de discriminação litológica (Blodget et alii, 1978) ajustar-se-ia ao primeiro critério (Tabela 2). Pelos dados da Tabela 3, os melhores produtos de divisões de canais seriam: 4/7, 4/5 e 5/7 (primeiro critério) e 4/7, 4/6 e 6/7 (segundo critério). A análise destes resultados indica que apenas a divisão 4/7 foi escolhida pelos dois critérios e que, pelos critérios de seleção de atributos empregados, em nenhuma ordenação foi indicada a composição de divisões 4/5, 5/6 e 6/7 para composições coloridas, muito utilizada em literatura para propósitos de mapeamento geológico (Rowan et alii, 1974; Blodget et alii, 1978).

Em relação ao Híbridos (Tabela 4), as combinações indicadas foram distintas pelos dois critérios, sendo que apenas o canal 4 participou simultaneamente (canais 4, 7 e 5/7 pelo primeiro critério e canais 4, 6 e 4/6, pelo segundo critério).

Procurando-se avaliar o significado destes resultados, foi realizada uma avaliação visual de desempenho dos canais originais e das divisões de canais na discriminação litológica. A avaliação visual dos produtos fotográficos<sup>1</sup>, ampliadas na escala 1:100.000 do vídeo do GE-Image-100, foi desenvolvida independentemente por três foto-intérpretes, a fim de evitar subjetividade nas análises.

Treze das quatorze classes temáticas da Fig. 2 (a classe quartzito ferruginoso, situada na borda ocidental da área não teve toda sua extensão ampliada em alguns produtos, sendo desconsiderada na fotoanálise) foram analisadas segundo dois índices:

- a) Índice de detecção ( $I_d$ ) = denota a possibilidade de se detectar espacialmente a classe de interesse ou, em outras palavras, indica a potencialidade de se individualizar espacialmente as treze classes consideradas no produto realçado. Este índice foi expresso percentualmente por:

$$13 \text{ classes detectáveis} = 100\%, \quad I_d = \frac{n \times 100}{n \text{ classes detectáveis} = I_d, \quad 13}$$

- b) Índice de separabilidade ( $I_s$ ) = indica a capacidade de separabilidade entre classes nos realces, sendo baseado nas discrepâncias de brilho visualmente perceptíveis.

<sup>1</sup> Cada canal foi previamente realçado por Ampliação Linear de Contraste para melhoria de contraste entre os níveis de cinza. O algoritmo usado nesta transformação é  $L_s = a L_e + b$ , onde  $L_s$  = valor digital do "pixel" de saída,  $L_e$  = valor do "pixel" original e  $a$  e  $b$  são ganho e "offset", respectivamente.

Tabela 2 — Primeiro e segundo critérios JM para os 4 canais originais MSS LANDSAT

Ordenação das distâncias JM <sup>2</sup> médias nos 4 melhores subconjuntos de canais que maximizam a distância JM <sup>2</sup> média	Notação de Canais	Notação de Classes
CANAIS: 1 2 4 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,8731	1 : MSS 4	1. TNBN 2. RCCA 3. TNBO 4. QTZITO 5. CALC 1 6. CALC 2 7. FILITO 8. ELÚVIO 9. QC 10. ALUVIÃO 11. CALC 3 12. VEGET 13. MARFIL 14. XISGN
CANAIS: 1 3 4 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,8300	2 : MSS 5	
CANAIS: 1 2 3 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,8209	3 : MSS 6	
CANAIS: 2 3 4 D JM <sup>2</sup> O MÉDIA = 1,8160	4 : MSS 7	
Ordenação das distâncias JM <sup>2</sup> mínimas nos 4 melhores subconjuntos de canais que maximizam a mínima distância JM <sup>2</sup> no subconjunto para um dado par de classes	Notação de Canais	Notação de Classes
CANAIS: 1 2 3 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,50776 CLASSES: 3 e 11	1 : MSS 4	1. TNBN 2. RCCA 3. TNBO 4. QTZITO 5. CALC 1 6. CALC 2 7. FILITO 8. ELÚVIO 9. QC 10. ALUVIÃO 11. CALC 3 12. VEGET 13. MARFIL 14. XISGN
CANAIS: 1 3 4 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,48432 CLASSES: 3 e 11	2 : MSS 5	
CANAIS: 2 3 4 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,31105	3 : MSS 6	
CANAIS: 1 2 4 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,29679 CLASSES: 3 e 11	4 : MSS 7	

O cálculo da percentagem para este índice foi expresso por:

$$156 (12 \times 13 \text{ ou realce ótimo}) = 100\%, \quad I_s = \frac{n \cdot 100}{n \text{ calculado} = I_s, \quad 156}$$

O valor n calculado representa, portanto, o desempenho de separabilidade de cada produto, sendo dado pelo somatório da separabilidade entre classes, i.é, corresponde à soma da separabilidade de cada classe em relação às outras restantes, considerando-se todas as classes detectadas no produto analisado. Os valores de Id e Is para os canais originais e divisões de canais são vistos em parte da Tabela 5.

A análise dos dados da Tabela 5 indica que dos quatro

canais originais, os canais 7, 4 e 5 nesta seqüência são os que apresentam visualmente melhor desempenho médio em discriminação litológica na área, segundo as treze classes consideradas. Tais conclusões são coincidentes com o primeiro critério de distância JM (Tabela 2). Em relação aos produtos de divisões de canais, a análise visual indicou o canal 5/7 como o de melhor desempenho médio, seguido pelo canal 4/5 e em terceiro pelo canal 6/7, que muito pouca diferença teria dos canais 4/7 e 4/6, todos com iguais índices de detecção (Id = 69,23%) e pequenas variações nos índices de separabilidade (Is = 39,74%; 38,46% e 36,53%, respectivamente). O pior produto da divisão de canais, na análise visual foi o 5/6, com 23% de Id e apenas 38% do Is.

Também no caso destes produtos de divisão de canais,

Tabela 3 — Primeiro e segundo critérios JM para os 4 canais MSS originais e os 6 "ratios" do LANDSAT.

Ordenação das Distâncias JM <sup>2</sup> médias nos 6 melhores subconjuntos de canais que maximizam a Distância JM <sup>2</sup> média	Notação de Canais	Notação de Classes
CANAIS: 1 3 5 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,6369	1 : MSS 4/7	1. TNBN 2. RCCA 3. TNBO
CANAIS: 2 3 5 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,6211	2 : MSS 4/6	4. QTZITO 5. CALC 1 6. CALC 2
CANAIS: 1 2 5 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,6190	3 : MSS 4/5	7. FILITO 8. ELÚVIO 9. QC
CANAIS: 3 4 5 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,6182	4 : MSS 5/6	10. ALUVIÃO 11. CALC 3 12. VEGET.
CANAIS: 2 4 5 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,6179	5 : MSS 5/7	13. MARFIL 14. XISGN
CANAIS: 1 4 5 D JM <sup>2</sup> MÉDIA = 1,6171	6 : MSS 6/7	
Ordenação das Distâncias JM <sup>2</sup> mínimas nos 6 melhores subconjuntos de canais que maximizam a mínima Distância JM <sup>2</sup> no subconjunto, para um dado par de classes	Notação de Canais	Notação de Classes
CANAIS: 1 2 6 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,48735 CLASSES: 4 e 10	1 : MSS 4/7	1. TNBN 2. RCCA 3. TNBO
CANAIS: 2 3 5 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,37058 CLASSES: 1 e 10	2 : MSS 4/6	4. QTZITO 5. CALC 1 6. CALC 2
CANAIS: 2 5 6 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,36390 CLASSES: 1 e 10	3 : MSS 4/5	7. FILITO 8. ELÚVIO 9. QC
CANAIS: 2 4 5 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,36079 CLASSES: 1 e 10	4 : MSS 5/6	10. ALUVIÃO 11. CALC 3 12. VEGET.
CANAIS: 1 2 3 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,35999 CLASSES: 4 e 13	5 : MSS 5/7	13. MARFIL 14. XISGN
CANAIS: 2 4 6 D JM <sup>2</sup> MIÑIMA = 0,35991 CLASSES: 1 e 10	6 : MSS 6/7	

os resultados da análise visual são compatíveis com a ordenação segundo o primeiro critério por distâncias JM (ver Tabela 3), o que indica ser este critério bem mais poderoso e realístico na ordenação de melhores subconjuntos de canais

na discriminação litológica. As discrepâncias observadas na indicação do terceiro melhor canal (6/7 pela análise visual e 4/7 pelo primeiro critério JM) podem ser explicadas por variações no cômputo geral, ligadas a não consideração da

Tabela 4 — Primeiro e segundo critérios JM para os 4 canais MSS originais e os 6 "ratios" do LANDSAT.

Ordenação da Distância $JM^2$ Médias nos 6 melhores subconjuntos de canais que maximizam a Distância $JM^2$ Média	Notação de Canais	Notação de Classes
CANAIS: 1 4 9 D $JM^2$ MÉDIA = 1,8733	1 : MSS 4 2 : MSS 5	1. TNBN 2. RCCA 3. TNBO
CANAIS: 4 7 9 D $JM^2$ MÉDIA = 1,8732	3 : MSS 6 4 : MSS 7	4. QTZITO 5. CALC 1 6. CALC 2
CANAIS: 1 2 4 D $JM^2$ MÉDIA = 1,8731	5 : MSS 4/5 6 : MSS 4/6	7. FILITO 8. ELÚVIO 9. QC
CANAIS: 2 4 7 D $JM^2$ MÉDIA = 1,8730	7 : MSS 4/7 8 : MSS 5/6	10. ALUVIÃO 11. CALC 3 12. VEGET
CANAIS: 4 5 9 D $JM^2$ MÉDIA = 1,8728	9 : MSS 5/7 10 : MSS 6/7	13. MARFIL 14. XISGN
CANAIS: 2 4 5 D $JM^2$ MÉDIA = 1,8727		
Ordenação das Distâncias $JM^2$ mínimas nos 6 melhores subconjuntos de canais que maximizam a mínima Distância $JM^2$ no subconjunto, para um dado par de classes	Notação de Canais	Notação de Classes
CANAIS: 1 3 5 D $JM^2$ MÍNIMA = 0,84014 CLASSES: 3 e 11	1 : MSS 4 2 : MSS 5 3 : MSS 6	1. TNBN 2. TCCA 3. TNBO 4. QTZITO
CANAIS: 3 6 9 D $JM^2$ MÍNIMA = 0,66165 CLASSES: 3 e 11	4 : MSS 7 5 : MSS 4/5	5. CALC 1 6. CALC 2 7. FILITO 8. ELÚVIO
CANAIS: 1 3 9 D $JM^2$ MÍNIMA = 0,64430 CLASSES: 3 e 11	6 : MSS 4/6 7 : MSS 4/7 8 : MSS 5/6	9. QC 10. ALUVIÃO 11. CALC 3 12. VEGET
CANAIS: 1 6 9 D $JM^2$ MÍNIMA = 0,63570 CLASSES: 3 e 11	9 : MSS 5/7 10 : MSS 6/7	13. MARFIL 14. XISGN
CANAIS: 4 5 8 D $JM^2$ MÍNIMA = 0,62248 CLASSES: 8 e 14		
CANAIS: 3 7 9 D $JM^2$ MÍNIMA = 0,62033 CLASSES: 3 e 11		

Tabela 5 — Análise do desempenho visual dos 4 canais originais, "ratios" e composições coloridas na discriminação litológica de classes da figura 2.

PRODUTO	Id (%)	Is (%)
MSS 4	76,92	51,28
MSS 5	76,92	50,00
MSS 6	76,92	46,15
MSS 7	84,60	56,52
MSS 4/5	76,92	51,28
MSS 4/6	69,23	36,53
MSS 4/7	69,23	38,46
MSS 5/6	23,00	3,80
MSS 5/7	84,60	66,60
MSS 6/7	69,23	39,74
COMPOSIÇÃO COLORIDA NORMAL	96,15	89,84
COMPOSIÇÃO COLORIDA HÍBRIDA	96,15	89,23
COMPOSIÇÃO COLORIDA COMPONENTES PRINCIPAIS	84,61	65,23
COMPOSIÇÃO COLORIDA "RATIO"	73,00	46,15

classe quartzito ferrífero na fotoanálise. Em se tratando do produto híbrido, os resultados da Tabela 4 são de modo geral convergentes, sendo indicado pelo primeiro critério JM o conjunto de canais 5/7, 7 e 4 e pela análise visual, o conjunto 5/7, 7 e 4 ou 4/5.

Nas Figs. 3, 4 e 5 são mostrados os canais MSS 4, 7 e 5/7, considerados os três melhores canais para a composição híbrida.

Aceitando-se estes resultados como representativos de uma análise sobre o desempenho, em um teste prático, de discriminação visual de litologias, como complemento à pesquisa, buscou-se avaliar visualmente a performance das composições coloridas. Quatro produtos da época seca foram analisados: *Composição Colorida Normal* (canais 4, 5 e 7 e cores azul, verde e vermelho, respectivamente), *Composição Colorida Híbrida* (canais 5/7, 7 e 4 e cores azul, vermelho e verde, respectivamente), *Composição Colorida "Ratio"* (canais 4/5, 5/7, 4/7 e cores vermelho, verde e azul, respectivamente) e *Composição Colorida de Componentes Principais*<sup>1</sup> (1ª CP, 2ª CP e 3ª CP e cores

<sup>1</sup> Componentes Principais = transformação linear ortogonal C, tal que  $Y = Cx$ , sendo que x é um canal (variável) original MSS, C é uma matriz de transformação linear  $q \times p$ , onde  $q \leq p$ ; e Y é o novo canal ou Componente Principal obtido. C é a matriz de transformação ou matriz dos autovetores obtida à partir da matriz de covariância dos canais originais.

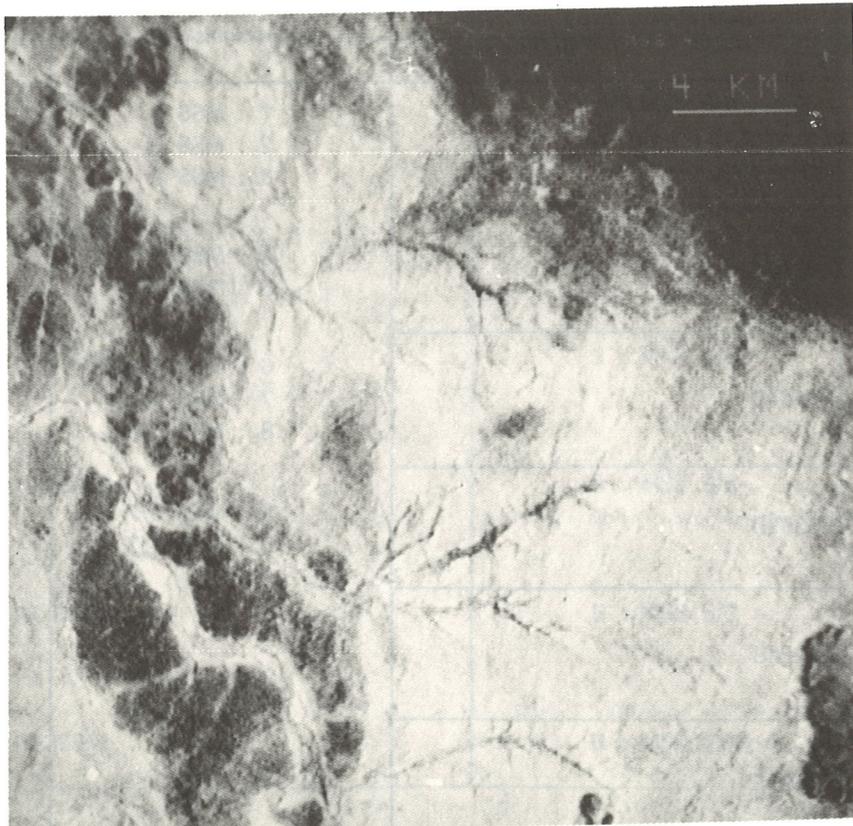


Figura 3 — Canal 4 do MSS-LANDSAT realçado por Ampliação Linear de Contraste (intervalo digital de ampliação 32-80).

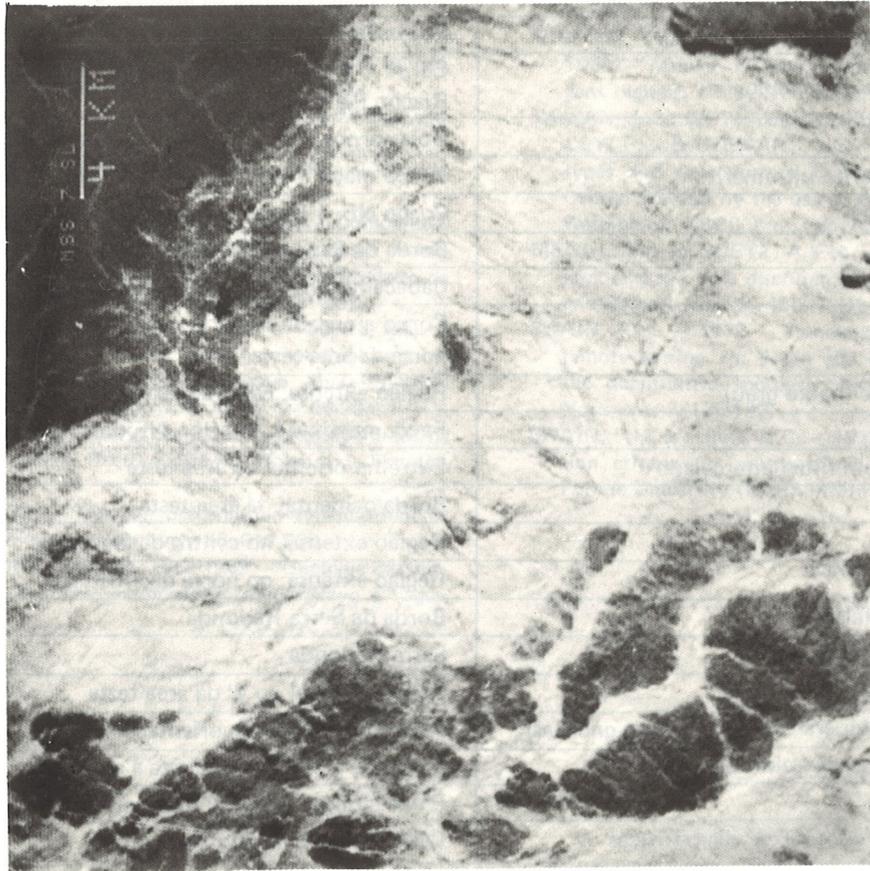


Figura 4 — Canal 7 do MSS-LANDSAT realçado por Ampliação Linear de Contraste (intervalo digital de ampliação 32-112).

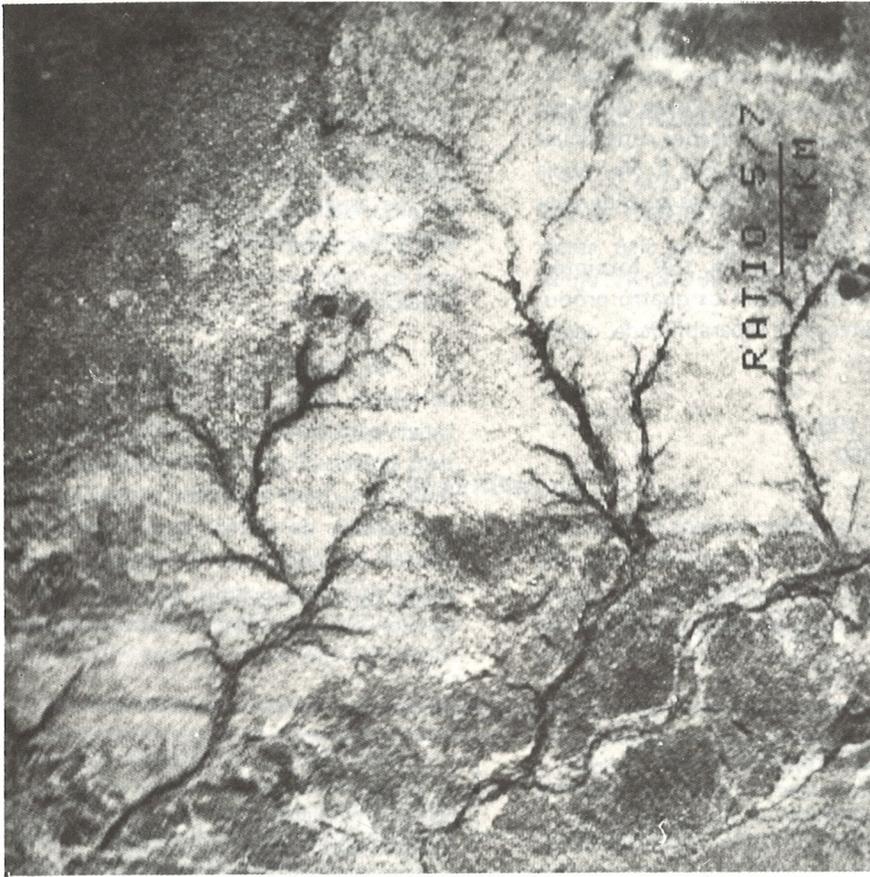


Figura 5 — Canal MSS 5/7 realçado por Ampliação Linear de Contraste (intervalo digital de ampliação 80-192; ganho 200, 'offset' 50).

azul negativo, vermelho e verde, respectivamente).

Para que a análise se revestisse de um caráter bem mais abrangente que as limitações de classes temáticas do Sistema SELATR, foram consideradas 26 classes temáticas na área teste, as quais representavam situações superficiais variadas, ligadas às unidades litológicas da Fig. 2. Na Tabela 6 são indicadas as localizações das 26 classes consideradas no desempenho dos produtos coloridos.

Da mesma forma que anteriormente, três fotointérpretes analisaram de modo independente os quatro produtos, segundo os índices de detecção e separabilidade, dados por:

$$I_d = \frac{n \cdot 100}{26} \quad \text{e} \quad I_s = \frac{n \cdot 100}{650}$$

A tabela 5 mostra os resultados obtidos nas ordenações. Destes dados, conclui-se que os desempenhos das composições Normal e Híbrida são equivalentes, com a ressalva de ser o produto Híbrido superior na discriminação de

grandes unidades e a composição Normal ser mais eficiente no contraste tonal de detalhes (mafitos, cálcico-silicáticas, etc.). Por outro lado, comprovou-se a superioridade dos Componentes Principais em relação à Composição Colorida "Ratio". Pode-se afirmar que as informações extraídas do realce pelas Componentes Principais complementam em muitos aspectos, e comprovam em outros, os contrastes mostrados nas Composições Híbrida e Normal.

## CONCLUSÕES

Os resultados fornecidos pela utilização de critérios de seleção de atributos espectrais na indicação de melhores canais para combinações coloridas confirmaram as expectativas prévias. O primeiro critério, utilizando da Distância JM, mostrou-se mais adequado e exprimiu realisticamente a potencialidade da técnica como uma alternativa eficiente na seleção de bandas em abordagens multicanais de discriminação de rochas e solos, como as que ocorrerão com os dados do TM-LANDSAT 5 (sete novos canais de melhor reso-

Tabela 6 — Localização aproximada das classes temáticas consideradas na análise visual das composições coloridas

CLASSE TEMÁTICA	LOCALIZAÇÃO APROXIMADA (REF. FIGURA 1)
Classe 1 — cobertura calcífera	Borda SW da área teste
Classe 2 — depósito de elúvio	Corpo maior, centro de área teste
Classe 3 — drenagem por vegetação perenofólia	Riacho da Melância
Classe 4 — depósitos de aluvião	Rio Curaçá
Classe 5 — calcário caatinga	Corpo maior, centro da área-teste
Classe 6 — quartzito ferrífero	Borda SW da área-teste
Classe 7 — corpo cálcico-silicatado	Corpo N-S truncando afluente direito do Riacho Malhado da Pedra
Classe 8 — anfibolitos	Dois corpos, 1 km ao norte do Riacho Banguê
Classe 9 — corpo de mafito-ultramafito	Corpo maior 1 km NW da Serra Cana Brava
Classe 10 — gabro (dique)	Corpo NE, 1 km ao sul do Riacho Melância
Classe 11 — filito	Borda da Serra da Cana Brava
Classe 12 — filito	Cabeceiras direita do Riacho Melância
Classe 13 — filito	Corpo alongado cortado por estrada, norte da área-teste
Classe 14 — xisto-gnaiss (baixo grau)	Região extensa, NE área-teste
Classe 15 — filito/xisto	Faixa marginal à anterior, NE da área-teste
Classe 16 — mármore com filtro intercalado	Extremo oriental da área-teste
Classe 17 — mármore	Borda ocidental da área-teste
Classe 18 — mármore	Região extensa, no centro da área-teste
Classe 19 — mármore	Região extensa, no norte da área-teste
Classe 20 — cataclasito félsico	Borda da Serra Redonda
Classe 21 — sienito-gnaissificado	Serra Redonda
Classe 22 — quartzo feldspato gnaiss	Faixa marginal no W da área-teste
Classe 23 — granulitos (hiperstênio-hornblenda-gnaisses)	Faixa ocidental com orientação N-S
Classe 24 — quartzo-feldspato-biotita-gnaisses	Extremo oriental, adjacente à anterior
Classe 25 — migmatitos	Faixa alongada central da área-teste
Classe 26 — migmatitos com faixas pegmatíticas	Cabeceiras do Riacho Banguê

lução espacial e radiométrica). Em relação ao segundo critério, o baixo desempenho mostrado desaconselha sua utilização, pelo menos em condições similares às da área de pesquisa. Levando em conta, também, o custo computacional mais elevado para a obtenção dos produtos híbridos, bem como o baixo desempenho dos "ratios", sugere-se o uso do par "Composição Colorida Normal + Composição Colorida de Componentes Principais", como o mais adequado a propósitos de discriminação de rochas e seus produtos de alte-

ração, de ambientes tropicais semi-áridos e de pouco relevo, semelhante ao da área de pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

O autor expressa seus agradecimentos aos companheiros do INPE/SJC, Dr. Ícaro Vitorello, Paulo Roberto Meneses, pelo auxílio visual nas fotoanálises dos realces e Luciano Vieira Dutra pelas sugestões e revisão crítica do texto.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M. — 1981 — O craton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. Anais do Simpósio sobre o Craton do São Francisco e suas Faixas Marginais, Salvador, SME/CPM/SBG: 1-10.
- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B. & FUCK, R. — 1981 — Brazilian structural provinces: An introduction; Earth Sci. Rev. 17: 1-29.
- BLODGET, H.W., GUNTHER, F.J. & PODWYSOCKI, M.H. — 1978 — Discrimination of rocks types and alteration products in South Western Saudi-Arabia with computer enhancements of LANDSAT data. NASA Tech. Pap. 1327, USA, 34 pp.
- DELGADO, I.M. & SOUZA, J.D. — 1975 — Projeto Cobre-Curaçá — Relatório Final — Geologia econômica do distrito cuprífero do Rio Curaçá, Bahia, Brasil. Convênio DNPm-CPRM, Salvador, CPRM, 30 volumes.
- DUTRA, L.V. — 1982 — Extração de atributos espaciais em imagens multiespectrais. Dissertação de Mestrado, INPE/CNPq — São José dos Campos. 86 pp. (relatório INPE-2315-TDL/078).
- FOLK, L. — 1951 — A comparison chart for visual percentage estimation. Petrol., 21: 32-33.
- GENERAL ELECTRIC — 1975 — Image 100 User Manual. Flórida, 119 p.
- LI, F.A.M., DUTRA, L.V. & MENDES, C.L. — 1982 — Comparação entre os métodos de Entropia e Jeffreys — Matusita em problemas de seleção de atributos. Anais do II Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Brasília. INPE/CNPq: 621-627.
- JARDIM DE SÁ, E.F., MC REATH, I., BRITO NEVES, B.B. & BARTELS, R.L. — 1976 — Novos dados geocronológicos sobre o craton do São Francisco no Estado da Bahia. Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto, 4: 185-204.
- JORDAN, H. — 1968 — O calcário Bambuí e o Grupo Canudos na região de Curaçá, Bahia. Recife SUDENE, Boletim de Estudos, nº 4: 59-63.
- JORDAN, H. — 1972 — The late precambrian synclinalorium of Curaçá, Brasil. Geologisches Jahrbuch, 88: 617-628.
- LADEIRA, E.A. & BROCKES JR., H. — 1969 — Geologia das quadriculas de Poço de Fora, Esfomeado, Tanque Novo e Lages, distrito cuprífero do Rio Curaçá, Bahia. Relatório DNPm, 116, 2 vols., Rio de Janeiro.
- LEUBE, A. — 1972 — Prospecção de cobre no norte da Bahia. Hannover, MGA — SUDENE, vol. 1, 98 pp.
- PARADELLA, W.R. & VITORELLO, I. — 1982 — Sensores remotos na geologia: tendência atual e perspectivas futuras com dados de satélite. Ciências da Terra, 5: 19-23.
- PARADELLA, W.R. — 1983 — 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, IGUSP, S. Paulo, 233 pp.
- PODWYSOCKI, M.H., GUNTHER, F.S. & BLODGET, H. — 1977 — Discrimination of rock and soil types by digital analysis of LANDSAT data. Maryland, Goddard Space Flight Center, GSFC-X-923-77, 17 pp.
- RIBEIRO, E.A., LI, F.A.M., MOREIRA, J.C. & DUTRA, L.V. — 1982 — Manual do usuário dos sistemas de tratamento de imagens digitais. LTID-INPE/CNPq. São José dos Campos, 158 pp.
- ROWAN, L.C., WETLAUFER, P.H., GOETZ, A.F.H., BILLINGSLEY, F.C. & STEWART, J.H. — 1974 — Discrimination of rock types and detection of hydrothermal altered areas in South Central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS image. Washington, USGS. Prof. Pap. 883, 35 pp.
- SIEGAL, B.S. & GOETZ, A.F.H. — 1977 — Effect of vegetation on rock and soil type discrimination. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43(2): 191-196.
- SWAIN, P.H. — 1978 — Fundamentals of pattern recognition in remote sensing. In: Swain and Davis (editors) Remote sensing: the quantitative approach, McGraw Hill Int. Book Co, New York, cap. 3: 136-187.
- SWAIN, P.H. & KING, R.C. — 1973 — Two effective feature selection criteria for multispectral remote sensing. W. Lafayette. Purdue University (LARS Information note 042673).

Versão original recebida em Jun./1984;  
Versão final, em Jan./1985.