

A Espectrometria de Reflectância Aplicada ao Mapeamento Geológico da Porção Extremo Nordeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil

VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO¹

GILBERTO AMARAL²

PATRICK LAUNEAU³

¹UFRN-Departamento de Geologia

Caixa Postal 1639, 59072-970 Natal, RN, Brasil

²UNICAMP-Instituto de Geociências

Caixa Postal 6152, 13081-970 Campinas, SP, Brasil

³Université de Nantes, Laboratoire de Petrologie Structurale

2, Rue de la Houssinière, 44072 Nantes, França

Abstract.In order to increase spectral contrast from Landsat 5-TM for geological applications, statistical procedures based on reflectance spectrometry of natural samples were tested. For the Oriental Portion of Borborema Province, lithological discrimination was based on the spectral response of different rock types, mainly subalkaline to alkaline Brasiliano-age granites. The study area is characterized by a network of crustal-scale shear zones and transtraccional sites related to high temperature and low pressure metamorphism and even control the geometry of supracrustal belts and granitoid emplacement

Keywords: Remote Sensing, Geological Mapping, Reflectance Spectrometry

1 Introdução

No Setor Extremo Nordeste da Província Borborema, o arranjo cinemático de zonas de cisalhamento de escala litosférica, desenvolvido durante a Orogênese Brasiliano, promoveu a instauração de domínios transtraccionais e extensionais sobre o substrato siálico composto predominantemente de rochas gnáissico-migmatíticas do Arqueano e Paleoproterozóico (Dantas *et al.* 1997). A deformação transtraccional dominante exerceu o controle sobre a geometria de faixas supracrustais (p.ex. a faixa de micaxistos de Barra de Santa Rosa), concomitante a metamorfismo no fácies granulito sob condições de alta temperatura e baixa pressão, com extensiva migmatização e granitogênese. A variedade de suítes graníticas relacionadas às extensas zonas de cisalhamento com regimes combinados transcorrente e extensional sugere o envolvimento de fontes mantélicas enriquecidas e/ou metassomatizadas, canalizadas pelas zonas de cisalhamento que alcançariam profundidades do manto litosférico.

O contexto geográfico destes terrenos, com amplas exposições incluídas no semi-árido do Nordeste do Brasil, favoreceram o emprego do aspecto sinóptico e multiespectral das imagens do Landsat 5-TM no aperfeiçoamento do mapeamento das unidades litoestratigráficas, com ênfase no zoneamento tectonometamórfico e na diferenciação das suítes granitóides. Entretanto, nos

estudos sobre o envolvimento as imagens do Landsat 5-TM na discriminação litológica e realce das feições deformacionais, o senso comum sobre as melhores combinações coloridas de bandas ainda não está plenamente estabelecido (Chavez *et al.* 1984, Sheffield 1985, Hunt *et al.* 1986, Crippen 1989).

2 Objetivos Principais e Área de Estudo

No presente estudo foi desenvolvido um método estatístico de seleção dos conjuntos de trios de bandas do Landsat 5-TM com melhores desempenhos no mapeamento geológico de parte do Setor Extremo Nordeste da Província Borborema. A abordagem estatística considerou o comportamento das assinaturas espectrais de amostras de mão representativas das principais unidades litológicas da área de estudo. Estas respostas espectrais demonstraram estreita correlação com os dados mineralógicos e geoquímicos de elementos maiores das rochas, sobretudo das suítes granitóides analisadas, justificando a utilização desses espectros como elementos de distinção litológica. A distribuição gaussiana das curvas espectrais na faixa do espectro eletromagnético (EEM) do visível-infravermelho, favoreceu a quantificação das variâncias e correlações nas bandas do Landsat 5-TM (bandas 1-5 e 7) combinadas 3 a 3. Os conjuntos de trios de bandas com maiores correlações foram selecionadas para composições coloridas RGB e submetidas a inspeção visual para delimitação das diversas unidades de paisagem. Os resultados demonstraram a aplicabilidade do método em imagens Landsat 5-TM no incremento do mapeamento geológico na região entre Barra de Santa Rosa e Campina Grande, sugerindo a ampliação dos procedimentos para outros setores da região.

A principal área selecionada possui cerca de 3850 km², entre os meridianos 35°32'50"-36°02'50"W e paralelos 06°46'22"-07°24'36"S, com a cidade de Campina Grande/PB localizada próximo ao centro da área (**Figura 1**), envolvendo parcialmente a região de coleta das amostras para as medidas de espectrometria de reflectância. A partir desta área foram destacadas subáreas para maior detalhamento, com enfoque na distinção das unidades litológicas e realce das feições deformacionais.

3 Metodologia

Os processamentos digitais foram realizados com o o *software ER-Mapper v.5.2-Unix* da *Earth Resource Mapping Pty Ltd.* disponível no *Centre for Remote Sensing* do *Imperial College-University College* de Londres (Inglaterra). Os dados espectrais apresentados foram obtidos no *Laboratoire de Pétrologie Structurale* da *Université de Nantes* (Nantes, França), onde as amostras-de-mão foram analisadas no espectroradiômetro **GER-3700** da *Geophysical & Environmental Research Corp.*, que atua na faixa espectral entre 0,25 µm e 2,5 µm (UV a SWIR) com três conjuntos de detectores (512 Si, 128 PbS, 64 PbS) integrados em 704 canais. O espectrorradiômetro dispunha de calibração automática conforme a iluminação da fonte natural, fibra óptica de captação para medidas de partículas com dimensões superiores a 3,0 µm e suporte do software SIGNATURE[®] para visualização dos espectros de reflectância em tempo real.

Nos tratamentos digitais foram empregadas as seis bandas com resolução espacial de 30 m (bandas 1-5 e 7) da cena do Landsat 5-TM de 10/julho/1989. Os procedimentos de tratamento digital das imagens seguiram dois estágios, anteriores à fotoanálise e fotointerpretação visual das

imagens resultantes. O primeiro estágio foi a seleção dos conjuntos de três bandas para aplicação no sistema RGB, que pode ser realizada por processos de decisões *a priori* ou através de procedimentos estatísticos (Yésou *et al.* 1993), como empregado nesse trabalho. No segundo estágio, foi efetuada a redução da dimensionalidade das informações contidas nas bandas através dos métodos de razão de bandas e análise fatorial, onde os tratamentos usados foram a Análise por Principais Componentes (PC), IHS e HRGB (*Hue/Red/Green/Blue*), aplicados ao conjunto das seis bandas (bandas 1-5 e 7) e/ou num grupo selecionado previamente com base na análise estatística da redundância entre as bandas. Entretanto, neste trabalho foram apresentadas apenas algumas imagens resultantes das composições coloridas em RGB.

Para as medidas de espectrometria de reflectância foram selecionadas amostras de mão representativas dos ortognaisses migmatíticos do embasamento (V-514), micaxistos e paragnaisses da Faixa de Micaxistos de Barra de Santa Rosa (V-517, V-518), granodioritos e quartzo-monzonitos do CCG (V-539, V-540), suítes alcalinas de Japi (MH-107) e Algodão (V-519, V-520), suítes porfíricas de Jandaíra (V-521) e Pocinhos (V-510, V-528), e grãos ou agregados policristalinos dos minerais com dimensões superiores a 5,0 mm, conforme as especificações da fibra óptica de captação. A análise das relações texturais (interrelações e granulometria dos grãos) e composições químicas permitiu a compreensão das formas das assinaturas espectrais das amostras-de-mão e grãos minerais específicos destas rochas. Estes elementos aliados aos fatores geomorfológicos e estruturais condicionantes das amostras, favorecem a correlação das observações pontuais à escala regional do mapeamento e a interpretação das imagens nos tratamentos digitais. Para as análises espectrais foram selecionadas de três a quatro faces por amostra, entre faces frescas e com pátina de alteração, com pelo menos duas medidas por face da amostra, e de três a quatro amostras por litologia. As medidas foram adquiridas ao ar-livre no mês de abril/1997 (primavera), sob condições de temperatura entre 28-30°C, umidade do ar entre 40-50 % RH e irradiação solar do horário entre 12 e 14 h.

4 Análise dos Espectros de Reflectância

Os diagramas da **Figura 2** apresentam os espectros de reflectância para o conjunto de amostras analisadas, que representam a relação entre o valor percentual medido da reflectância do material na faixa do espectro eletromagnético (EEM) abrangida pelo espectrorradiômetro **GERS-3700** (0,25 a 2,5 μm). As assinaturas espectrais apresentadas correspondem às médias aritméticas das assinaturas obtidas para cada uma das faces das amostras analisadas, onde os aspectos peculiares de cada face, como cobertura de pátinas de alteração e presença de líquens, constituíram os critérios de seleção das curvas. As faixas de comprimentos de onda das bandas do Landsat 5-TM que atuam no VNIR e SWIR (bandas 1-5 e 7) e a principal feição de absorção da clorofila (coluna verde em 0,675 μm) foram discriminadas nos diagramas. As áreas com vazios marcam as faixas onde ocorrem as principais feições de absorção da H₂O na atmosfera, centradas em 1,4 e 1,9 μm , definidas pelos baixos valores de reflectância das curvas espectrais.

A totalidade das assinaturas espectrais demonstra um tênue crescimento da reflectância em direção aos maiores comprimentos de onda (inclinação positiva da curva espectral), principalmente na faixa do visível no EEM (entre 0,4 e 0,7 μm), causado sobretudo pela presença do ferro em vários estados de oxidação e coordenação produzindo tonalidades que variam do

marrom ao róseo avermelhado nas rochas analisadas. Para a região do espectro além de 0,65 μm , a reflectância das rochas com predominância de minerais máficos tendem a permanecer constantes, enquanto a inclinação das curvas de reflectância das rochas félsicas permanece positiva. A ampliação dos contrastes de reflectância entre as litologias ocorre principalmente na região do infravermelho próximo (banda 4 do landsat 5-TM).

As amostras foram reunidas em duas categorias, com base na variação da reflectância no EEM: (A) a categoria das rochas granitóides com predominância em minerais félsicos e valores de reflectância variando entre 20-75 % (granitóides Japi, Caxexa, Algodão, Pocinhos e ortognaisse), e (B) a categoria de rochas com minerais máficos variando entre 10-28 %, ou proporções similares entre máficos e félsicos (micaxisto, paragnaisse, granitóides Jandaíra e CCG). Os principais minerais formadores das rochas graníticas, como o K-feldspato, quartzo e plagioclásio são pobres em íons Fe provocando a ampla variação dos valores da reflectância nas curvas espectrais, desde os menores até os maiores comprimentos de onda no EEM. Para as rochas ricas em minerais máficos, como anfibólios, biotita, piroxênios e opacos, as assinaturas espectrais sofrem baixos incrementos na reflectância, e até decréscimos, devido às absorções decorrentes dos íons Fe e OH, sobretudo nas faixas entre 0,85 e 1,1 μm e além de 2,1 μm . Outra feição diagnóstica dessas categorias de assinaturas espectrais, e conseqüentemente diferenciação das diversas litologias, é a alta reflectância das rochas graníticas em torno de 1,6 μm caracterizando a presença de íons Fe^{3+} , marcado pela intensa coloração rósea avermelhada dos K-feldspatos, em contraste com a depressão da curva de reflectância para as demais rochas cujas mineralogias comportam maiores proporções em íons Fe^{2+} .

5 Síntese das Principais Feições Espectrais Diagnósticas

As formas e as inclinações das curvas espectrais na faixa do EEM entre 0,25 e 2,5 μm são resultantes das propriedades mineralógicas e químicas inerentes e peculiares das amostras analisadas, e portanto diagnósticas do material analisado. As assinaturas espectrais dos diferentes materiais são comparadas nas faixas do EEM referentes às bandas do Landsat 5-TM, favorecendo a seleção das melhores bandas a serem empregadas nos tratamentos digitais para diagnose e discriminação das litologias.

A inspeção visual das curvas espectrais da Figura 2 indica similaridades entre as formas e inclinações das curvas em algumas faixas do EEM, sobretudo para os granitóides agrupados numa mesma categoria de variação da reflectância, que poderiam dificultar a discriminação entre as litologias baseada nos tratamentos digitais das bandas do Landsat 5-TM. Entretanto, algumas feições espectrais distintas, como a localização e a intensidade dos picos de absorção, ou a ausência de absorção numa faixa específica do EEM, permitem a caracterização das litologias, com base nos dados mineralógicos e geoquímicos, e sugerem a discriminação entre aquelas com grandes semelhanças. Entre as suítes alcalinas de Algodão, Caxexa e Japi, apesar das similitudes petrográficas e geoquímicas, as assinaturas espectrais mostram importantes feições específicas que definem a singularidade petrológica dos plútons, permitindo a discriminação entre as suítes com base nas bandas do Landsat 5-TM:

- A reflectância mais elevada em japi é controlada pela porcentagem modal dos minerais félsicos, principalmente pelo quartzo modal (25-35 %) maior que os teores de quartzo em

Caxexa e Algodão, ambos inferiores a 20 %, já que os teores em álcalis nesses últimos são sutilmente superiores as do Japi;

- As absorções das transições eletrônicas do Fe^{2+} - Fe^{3+} são mais acentuadas em Japi, devido aos teores de Fe mais elevados nos anfibólitos (hornblenda magnésiana com $\text{Fe} > 18\%$) e piroxênios (augita sódica com $\text{Fe} > 9\%$) de Japi, do que em Caxexa e Algodão (aegirina-augita com $\text{Fe} < 8\%$). As rochas alcalinas de Japi mostram teores médios de Fe_2O_3 (0,82-2,65 %) maiores do que em Caxexa (0,85-1,37 %) e Algodão (0,44-1,71 %);

- Na faixa do visível-infravermelho próximo (VNIR, bandas 1 a 4 do Landsat 5-TM), a assinatura espectral de Japi é positiva com inclinação marcante (reflectância variando de 34 a 74 %, do azul ao vermelho), indicando maiores teores de íons Fe^{2+} - Fe^{3+} ; as curvas são positivas para Caxexa e Algodão, com inclinações moderadas (reflectância variando de 20 a 42 %);

- Na faixa espectral entre 1,55 e 1,75 μm (banda 5 do TM) e entre 2,15 e 2,35 μm (banda 7 do TM) os níveis de reflectância de Caxexa e Algodão são idênticos (40 %) e inferiores ao de Japi (70 %), provavelmente relacionados aos teores médios de CaO, MgO e Al_2O_3 superiores em Japi do que em Caxexa e Algodão, como sugerem os diagramas químicos discriminantes (QP, SiO_2 vs. Elementos Maiores, R1-R2, TAS);

- Na faixa entre 2,1 e 2,35 μm (banda 7 do TM) a curva espectral de Japi mostra intensas absorções vibracionais do Al-OH (2,2 μm) e Mg-OH (2,35 μm), sugerindo processos vibracionais mais pronunciados, provavelmente devido aos teores médios de Al_2O_3 (13,01-16,11 %) e MgO (0,08-0,65 %) superiores aos de Caxexa ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12,66$ -15,01 %, MgO = 0,08-0,13 %) e Algodão ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12,54$ -16,16 %, MgO = 0,01-0,42 %);

- A curva espectral de Algodão mostra faixas de absorção muito sutis, quando comparadas àquelas dos demais granitóides, devido ao baixo percentual modal de minerais máficos (anfíbólitos, piroxênios e magnetita);

- As rochas graníticas analisadas exibiram características espectrais específicas no VNIR em função dos conteúdos de Fe, Ca, Mg, Al e OH. Estes elementos associados na mineralogia dominante e refletidos nas propriedades químicas das rochas causam diferenças sutis no índice de cor e albedos das rochas, resultando na assinatura espectral com aumento da reflectância para os maiores comprimentos de onda do EEM.

As principais feições espectrais úteis como critérios distintivos entre as assinaturas espectrais dos granitóides de Pocinhos, CCG e Jandaíra, foram listadas:

- A reflectância é mais elevada nas amostras analisadas de Pocinhos (sienogranitos), do que naquelas de Jandaíra e CCG, provavelmente controlada pela porcentagem modal de minerais félsicos, que condicionam inclusive a forma da curva, e de máficos em proporções inferiores a 15 %;

- A inclinação da curva de Pocinhos na faixa do VNIR (bandas 1 a 4 do Landsat 5-TM) é positiva e mais acentuada (reflectância variando de 22 a 40 %), sugerindo maior proporção de íons Fe^{2+} - Fe^{3+} , como mostram os picos de absorção mais acentuados em 0,63 e 0,75 μm ;

- Na faixa entre 1,55 e 1,75 μm (banda 5 do Landsat 5-TM), permanece a reflectância do Pocinhos em torno de 40 %, seguido por Jandaíra (28 %) e CCG (21 %), este último mostrando

pico de absorção em 1,6 μm mais acentuado, provavelmente devido a maior proporção de substituições do plagioclásio;

- Na faixa entre 2,1 e 2,35 μm (banda 7 do TM), as curvas são negativas, permanecendo as diferenças nos valores relativos das reflectâncias. As posições e intensidades das bandas de absorção provocada pelo íon OH nos minerais máficos indicam elementos distintivos: o granitóide Jandaíra apresenta bandas de absorção do Al-OH (2,25 μm) e Mg-OH (2,35 μm), mais intensas do que Pocinhos e CCG;

- As mais altas reflectâncias para os granitóides Japi, Caxexa, Algodão estão em 0,85 μm ; para os granitóides Pocinhos e CCG em 1,65 μm ; para o granitóide Jandaíra e ortognaisse do embasamento em 2,2 μm . Estas propriedades refletem a correlação entre a assinaturas espectrais e a alcalinidade dos granitóides.

6 Avaliação Estatística das Combinações de Bandas do Landsat 5-TM

A diversidade de medidas das assinaturas espectrais entre 0,25 e 2,5 μm favoreceu o emprego dos métodos de análise e interpretação dos dados do Landsat 5-TM na discriminação litológica e estrutural na região entre Algodão e Campina Grande (**Figura 1**). Na avaliação da exequibilidade do método, três questões fundamentais devem ser apresentadas e respondidas: (i) quais são as principais bandas do Landsat 5-TM ou combinação de bandas mais eficientes na discriminação das unidades litológicas mapeadas previamente ?; (ii) quais as combinações de bandas mais eficazes no diagnóstico das litologias similares, com variações mineralógicas e geoquímicas sutis ?; (iii) como as bandas e/ou combinação de bandas podem tornar-se mais eficazes na detecção detalhada de novas unidades e/ou alterações localizadas nas unidades?

Na avaliação estatística comparativa da forma e intensidade das curvas espectrais para os conjuntos de três bandas combinadas do Landsat 5-TM foi empregado um método onde o maior índice percentual (positivo ou negativo) obtido para as amostras analisadas indica a melhor correlação das curvas entre os canais. Os cálculos foram realizados com os valores médios da assinatura espectral do material analisado em cada banda do Landsat 5-TM, ponderados pela média nas três bandas empregadas numa distribuição gaussiana. Quanto maior o grau de afastamento entre os valores percentuais de cada material analisado para as 20 combinações de três bandas maior a distinção entre eles na composição colorida entre as três bandas. Os melhores resultados obtidos para as 20 combinações das seis bandas do Landsat 5-TM (1-5 e 7) para distinção de todas as litologias analisadas por espectrometria foram os conjuntos 1-3-5, 1-2-5, 1-3-7 e 2-3-5. Os conjuntos 1-2-3 e 2-3-4, freqüentemente empregados nos trabalhos de mapeamento geológico por envolverem as bandas no VNIR, mostraram os piores resultados na distinção das litologias, sendo os demais conjuntos úteis para comparações específicas envolvendo até três litologias, conforme as maiores diferenças entre os índices.

Os diagramas de dispersão comparativos para as categorias A e B indicam a habilidade dos 20 conjuntos de trios de bandas na distinção entre as litologias, agrupados segundo as categorias de proporções de minerais máficos e félsicos. Estes diagramas confirmaram que os conjuntos mais eficientes na individualização da maioria das litologias analisados foram 1-2-5, 1-3-5, 1-2-7 e 2-3-7, com afastamentos variando de 3 % a 40 %. Nos demais conjuntos ocorreram sobreposição entre as litologias, sobretudo entre Caxexa, Japi e Algodão, caracterizando a

proximidade mineralógica e geoquímica destes granitóides. Entretanto, a distinção entre os granitóides alcalinos, o ortognaisse do embasamento e Pocinhos pode ser obtida sutilmente nos conjuntos 2-3-4, 3-4-5, 1-4-7, 2-4-7 e 3-4-7. Os diagramas indicaram os conjuntos 1-5-7, 2-4-5, 2-5-7, 3-4-5, 3-4-7 e 3-5-7 como os mais distintivos para todas as litologias analisadas da categoria B, com variações entre 5 % e 40 %. As litologias com maiores sobreposições e semelhanças na assinatura espectrais são Pocinhos e o paragnaisse, cuja melhor distinção pode ser obtida nos conjuntos 1-5-7, 2-5-7 e 3-5-7.

7 Fotointerpretação de Algumas das Composições Coloridas em RGB e Discussões

Os principais conjuntos de trios de bandas destacados no método estatístico empregado, foram dispostos em composições coloridas no sistema RGB, apresentados segundo a seqüência como foram dispostos nos canais R-G-B. As imagens TM foram submetidas às modificações de contrastes dos histogramas, de forma a aperfeiçoar a distinção visual de diferentes aspectos na imagem resultante. Os métodos empregados envolveram transformações lineares (Aumento Linear de Contraste) e não-lineares (Gaussiana, Logarítmica, Equalização) correntes no *ER-Mapper v.5.2*, aplicadas para o realce da dinâmica visual de cada banda individualmente.

• Composições 5-2-1 e 5-3-1:

Estas composições em RGB propiciaram uma excelente discriminação das principais litologias presentes na área, como mostra a fotointerpretação dos aspectos geológicos decorrentes (**Figura 1**). Algumas das litologias que tiveram os espectros de reflectância analisados, foram diferenciados entre si e dos demais terrenos que compõem a área de estudo. Os ortognaisses migmatíticos da porção NW da área, embasamento da faixa de metassedimentos de Barra de Santa Rosa, mostraram cores entre o vermelho e vermelho-acastanhado devido ao elevado albedo produzido pela predominância de minerais félsicos, a alta reflectância dos íons Fe^{3+} centrada em $1,6 \mu m$, dos óxidos de ferro na banda 3 e à intensa banda de absorção por transição eletrônica dos íons Fe^{2+} - Fe^{3+} no visível (VIS, bandas 1 e 2). Os micaxistos de Barra de Santa Rosa apresentaram colorações variando entre marrom-amarelado e marrom-avermelhado, respectivamente em função do aumento do grau metamórfico (fácies xisto-verde a granulito com ampla migmatização), conforme o surgimento de piroxênios e o aumento no volume de magnetita nos paragnaises granulíticos e metapelitos migmatíticos da porção central da faixa envolvida da zona de cisalhamento Remígio-Pocinhos (ZCRP).

As suítes alcalinas de Algodão e Caxexa, mostraram cores análogas variando entre róseo-esbranquiçado e branco-azulado decorrentes da predominância de minerais félsicos (quartzo e feldspatos parcialmente alterados para argilo-minerais), dos picos dos minerais de argila que elevam o albedo na banda 5 e no VIS, do ápice de reflectância em torno de $1,6 \mu m$ do Fe^{3+} de alteração e das bandas de absorção no VIS devido às transições eletrônicas dos íons Fe^{3+} - Fe^{2+} , comuns nos minerais máficos.

O granitóide de Pocinhos mostrou coloração amarelo-esbranquiçada (quase branco), homoganeamente distribuída, que define a predominância dos feldspatos parcialmente substituídos por argilo-minerais, como indicam as características de albedo elevado na banda 5 e alta reflectância nas bandas 1 e 2, relativo às feições de absorção das transferências Fe^{2+} - Fe^{3+} e do campo dos cristais do Fe^{2+} no VIS, comuns aos minerais máficos. O granitóide é interceptado

por estreitas faixas marrom-avermelhadas marcando zonas de cisalhamento de direção NE originadas da distribuição em *splay* do sistema formado pelas zonas de cisalhamento Remígio-Pocinhos e Campina Grande (ZCRP e ZCCG, respectivamente). A coloração marrom-avermelhada nessas faixas indica aumento nos teores de íons ferro, provavelmente devido ao aumento nos teores de magnetita e/ou limonita, dos argilo-minerais e da cominuição dos grãos freqüentes nas zonas de cisalhamento.

O CCG apresentou cores entre magenta-escuro e azul-escuro decorrentes do baixo albedo, da associação entre a maior reflectância dos minerais máficos com OH na faixa do visível e aqueles ricos em óxidos de ferro na banda 5.

A fotointerpretação visual das imagens favoreceu ainda a caracterização geológica das demais porções do terreno, das quais não se dispõe de informações espectrais. As unidades de paisagem, delimitadas na fotointerpretação das imagens, foram confirmadas pelos dados de campo e serviram até mesmo como mapa-guia nas atividades de campo.

De maneira geral, os terrenos do embasamento puderam ser discriminados entre áreas de coloração vermelho a vermelho-amarelado, caracterizadas por ortognaisses migmatíticos de composição tonalítica a granodiorítica, predominantes na porção a N-NW da cidade de Campina Grande, limitada pelas zonas de cisalhamento Campina Grande e Guarabira (ZCCG e ZCGB, respectivamente), e áreas verde-azuladas a verde-amareladas compostas por granada-biotita-hornblenda gnaisses bandados e migmatíticos que ocupam a porção S-SE da área. Duas faixas de coloração cinza-azulado compostas por micaxistos migmatíticos foram destacadas na região de Alagoa Grande, formando vales alongados e constituídos por regolito (espessura > 3 m) e solo marrom escuro. Estas faixas estão envolvidas pela ZCGB e intercaladas aos granitóides e ortognaisses milonitizados do embasamento formando serras que delimitam os vales. A estreita faixa de micaxistos dispostas ao longo da ZCRP destacou-se pela coloração variando entre marrom-azulado e marrom-avermelhado e textura semelhante àquela das faixas de Alagoa Grande.

O granitóide de Queimadas a SSE de Campina Grande apresentou cores variando entre róseo e róseo amarelado controladas pelas bandas 5 e 2, que caracterizam a predominância de minerais félsicos através do albedo e dos ápices de reflectância do Fe^{3+} , que freqüentemente acompanham os minerais hidroxilados de alteração. A forma sigmoidal e estirada do corpo segue a terminação EW-NE do sistema de zonas de cisalhamento do lineamento Patos-Campina Grande. Trata-se de um granitóide cinza rosado predominantemente porfirítico de natureza monzogranítica a granodiorítica (tipo Itaporanga), com *fabric* ora preferencialmente PFC, definido pela orientação dos fenocristais de feldspatos em fluxo viscoso, ora SPD em faixas miloníticas e nas bordas do plúton, com cominuição dos grãos e critérios cinemáticos dextrais.

As imagens permitiram a caracterização do granitóide de Areia, que compõe a Serra do Jacu entre as cidades de Areia e Guarabira, de aspecto sigmoidal rotacionado entre a ZCRP dextral e as ZCCG-ZCGB de caráter sinistral. Trata-se de granitóide mesocrático a leucocrático de coloração cinza claro a cinza rosado, granulação média a grosseira, de textura microporfirítica a porfirítica e composição granítica a granodiorítica. Freqüentemente, apresenta *fabric* PFC, dada pela orientação dos fenocristais de K-feldspato e das fases máficas, evoluindo para o tipo SPD, marcada pelas caudas de recristalização dos feldspatos e pelos grãos de quartzo e máficos

estirados e, com cinemática dextral indicada pelas estruturas S-C e C', e porfiroclastos assimétricos rotacionados. O granitóide mostrou coloração cinza escura a cinza azulado nas imagens, com intercalações vermelho escuro a rosado, provavelmente devido às proporções de feldspatos parcialmente substituídos por argilo-minerais e minerais máficos como anfibólio e biotita presentes na matriz.

A avaliação integrada dos critérios morfológicos e texturais dos terrenos, aliados às colorações assumidas pelas unidades geológicas, possibilitaram a caracterização dos aspectos deformacionais da área, marcada pela terminação em *splay* do lineamento Patos, desdobrado no sistema formado pela ZCRP, ZCCG e ZCGB. Nos corredores de mais alto *strain* das zonas de cisalhamento de direção geral EW e NE, tanto as principais como as secundárias, os lineamentos constituem sistemas extensos e densos, de aspecto intensamente ramificado nas terminações, marcadores da foliação milonítica de mergulho mediano a forte. O traçado anastomosado da deformação dúctil e a forma sigmoidal assimétrica rotacionada e/ou estirada dos plútons granitóides, intrusivos nas zonas de cisalhamento, permitiram a determinação do principal caráter cinemático das zonas de cisalhamento, confirmado pelas informações de campo.

Um padrão de extensas zonas de falhas com direção geral EW e NW interceptam a área condicionando preferencialmente as drenagens secundárias, como mostram os lineamentos de geometria linear a curvilínea e localização espacial bem definida. Um conjunto de lineamentos de mesmo estilo e direção geral EW a NE, reciprocamente gradacionais com os lineamentos marcadores da deformação dúctil, provavelmente decorrentes de reativações nos ambientes dúctil-frágil e frágil, condicionam as principais drenagens primárias da região.

8 Conclusões

Os resultados apresentados demonstram que algumas peculiaridades mineralógicas e químicas das rochas e minerais podem ser discriminadas através das medidas de espectrometria de reflectância em amostras de mão. As assinaturas espectrais obtidas correspondem sobretudo aos componentes dominantes e originais das rochas, como demonstram os dados mineralógicos e geoquímicos de elementos maiores. A análise das feições espectrais propiciaram o diagnóstico de rochas petrologicamente análogas e o agrupamento em categorias, conforme a variação da reflectância no EEM. Um método de avaliação estatística foi desenvolvido com base na comparação dos valores médios da forma e intensidade das faixas de absorção nas assinaturas espectrais, ponderados numa distribuição gaussiana. O método comparativo permitiu a seleção dos conjuntos de trios de bandas do Landsat-TM que apresentam as melhores correlações entre as curvas espectrais. Estes conjuntos de bandas com melhores desempenhos (bandas 1-2-5, 1-3-5, 1-2-7 e 2-3-7) foram empregadas na melhoria do mapeamento geológico envolvendo a região de Barra de Santa Rosa e Campina Grande. A inspeção visual dessas imagens revelaram domínios com colorações e texturas distintos que correspondem às unidades litológicas no terreno, validando o emprego dos tratamentos estatísticos para outras áreas da região. Estes procedimentos constituíram uma importante contribuição dos tratamentos estatísticos de imagens digitais do Landsat 5-TM, aliados às informações petrológicas e de campo, no reconhecimento dos diversos ambientes geológicos envolvidos na evolução desse segmento crustal onde predominam regimes combinados transcorrentes e extensionais.

9 Referências Bibliográficas

- Chavez, P.S.; Guptil, S.C. & Bowell, J.A. *Image processing techniques for Thematic Mapper data*. Proc. Am. Soc. Photogramm. Conf., 1984.
- Crippen, R.E. *The dangers of underestimating the importance of data adjustment in band rationing*. Int. J. Remote Sensing 9:767-776, 1989.
- Dantas, E.L. *Geocronologia U-Pb e Sm-Nd de Terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos do Maciço Caldas Brandão, NE do Brasil*. Tese de Doutorado, UNESP, Rio Claro, 208 p., 1997.
- Hunt, G.A.; Drury, S.A. & Rothery, R. *Techniques for choosing the optimum TM channel combinations for lithological mapping in semi-arid terrains*. Proc. International Symposium on Mapping from Modern Imagery pp 637-646, 1986.
- Sheffield, C. *Selecting band combinations from multispectral data*. Photogramm. Eng. Remote Sensing 51:681-687, 1985.
- Yésou, H.; Besnus, Y. & Rolet, J. *Extracting of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery - a contribution to the study of geological structures*. ISPRS J. Photogramm. Rem. Sen. 48(5):23-36, 1993.

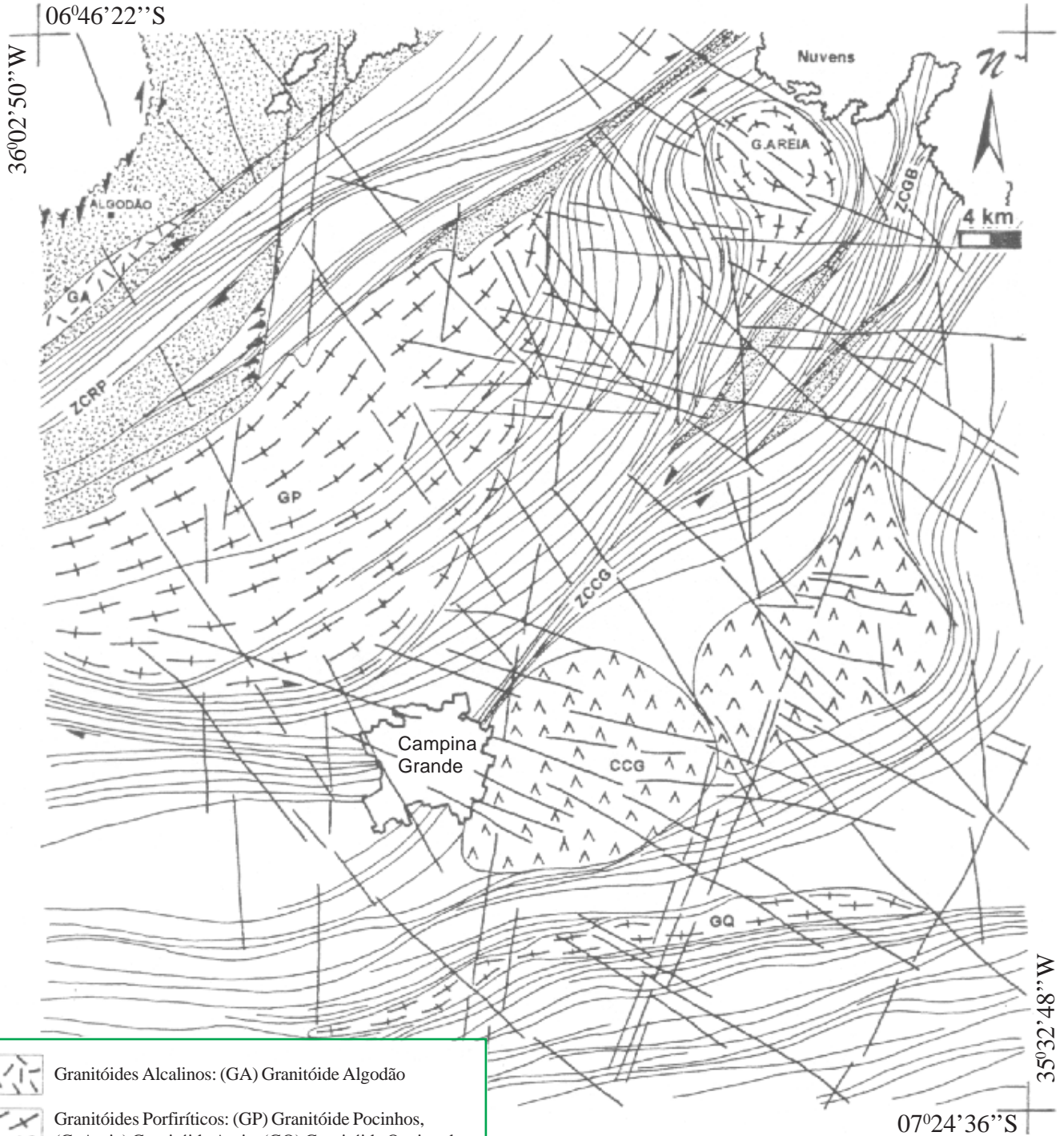


Figura 1 - Arcabouço Geológico da região entre Barra de Santa Rosa e Campina Grande (PB), fotointerpretado com base nas composições coloridas RGB das Bandas 521 e 531 do Landsat 5-TM.

Abreviaturas:
 ZCRP= Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos
 ZCCG= Zona de Cisalhamento Campina Grande
 ZCGB= Zona de Cisalhamento Guarabira

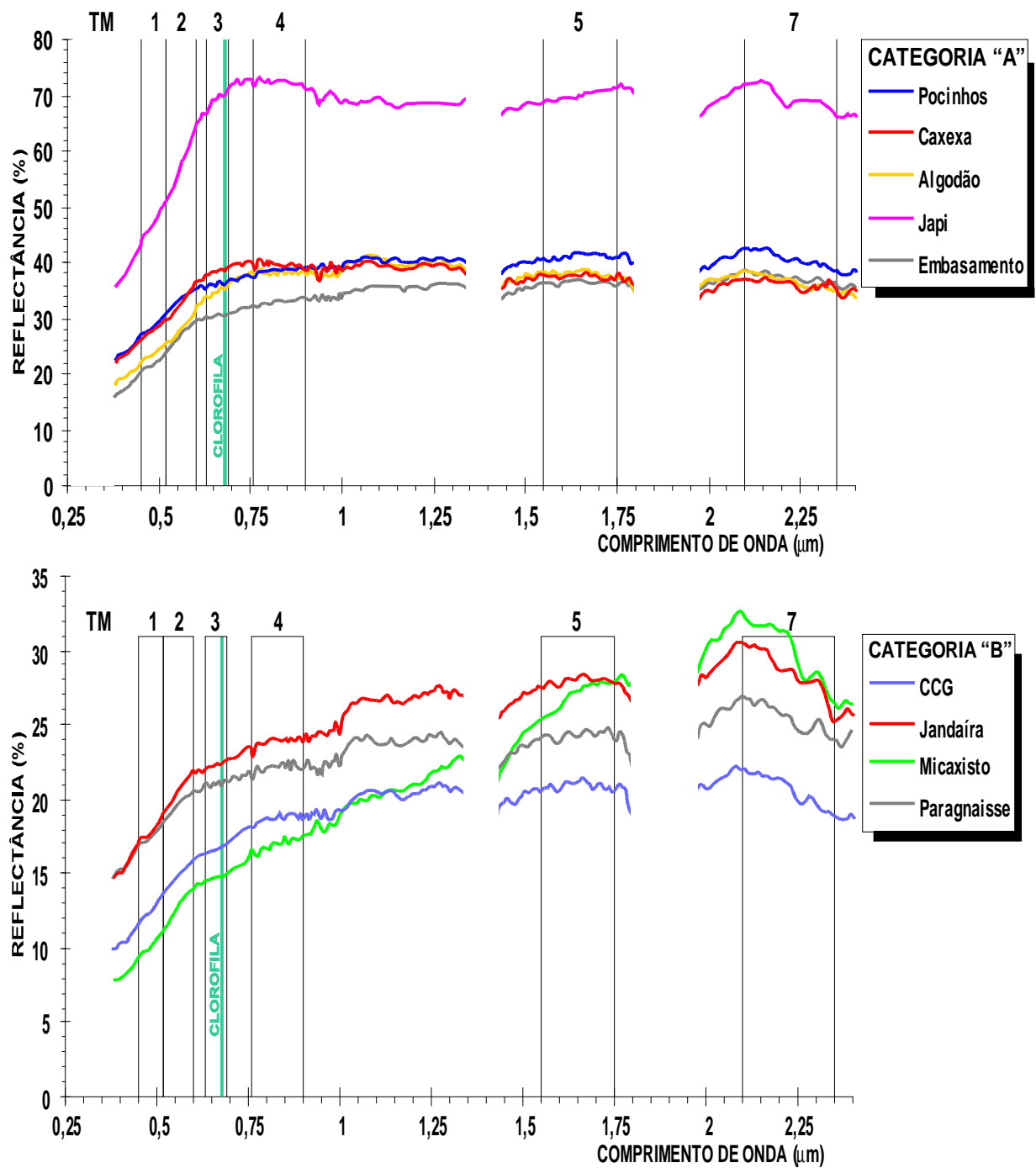


Figura 2 - Assinaturas espectrais de algumas litologias da região entre Barra de Santa Rosa e Campina Grande/PB, subdivididas nas Categorias A e B. Ver o texto para maiores detalhes.