

UMA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE
ROCHAS CARBONÁTICAS EM IMAGENS TM

Paulo Roberto Meneses
Universidade de Brasília - UnB
Departamento de Geociências
70.910 - Brasília - DF

RESUMO

Discute-se uma avaliação do desempenho das bandas TM do visível e infravermelho refletido, através de imagens digitais 1:50.000, para a discriminação espectral de rochas carbonáticas. Quatro fácies calcárias e dolomíticas foram individualizadas, cujas diferenças espectrais são devidas à presença de óxidos de ferro, matéria orgânica, radical CO_3^{--} e micromorfologia cárstica das superfícies das rochas. As bandas TM infravermelhas foram as que melhor evidenciaram as variações faciológicas dos carbonatos, numa escala compatível a mapeamentos de detalhe.

ABSTRACT

It is presented an avaluation of the visible and reflected infrared bands of TM-Landsat-5, using digital imagery enlarged to 1:50.000 scale, with the purpose to spectral discrimination of carbonate rocks. The results demonstrated the possibility of discriminating four limestone and dolomite facies which spectral behavior are related to the compositional variations of iron oxides, organic matter, CO_3^{--} radical, and karstic features of the rock surfaces. The infrared imagery showed to be the best bands to discriminated the carbonate rocks in a scale compatible to detail geologic mapping.

1 - INTRODUÇÃO

O intervalo e posição espectral das bandas TM do Landsat-5 coincidem mais favoravelmente com importantes feições espectrais de reflectância e absorvância diagnósticas de diversos minerais e rochas. Nesse sensor inclui-se uma banda infravermelha de $2,08\mu$ a $2,35\mu$ (banda 7), concebida essencialmente para a detecção de hidroxilas em argilominerais originados de alteração hidrotermal. Acontece que neste mesmo intervalo espectral da banda 7 também ocorrem importantes feições de absorção do íon CO_3^{--} , que poderiam tornar propícia a discriminação de rochas carbonáticas de outras litologias.

Entretanto, como geralmente os terrenos carbonáticos abrangem áreas relativamente grandes, com uma sucessão litostratigráfica de calcários e dolomitos muitas vezes pouco variáveis composicionalmente, o mais importante numa abordagem com sensoriamento remoto seria na realidade investigar a possibilidade

de discriminação de suas diferentes fácies. A dificuldade básica é devido ao íon CO_3^{--} dos dois minerais mais comuns das rochas calcárias e dolomíticas, respectivamente, os minerais calcita e dolomita, exibirem o mesmo comportamento de absorção espectral na região correspondente à banda 7 e terem um comportamento de reflectância invariável nos comprimentos de ondas menores das demais bandas TM. Desta forma, qualquer discriminação entre calcários e dolomitos ou de suas fácies, está condicionada à composição de seus constituintes mineralógicos menores, ou impurezas. Dentre eles, a matéria orgânica dispersa é a que exerce maior influência, sempre ocasionando uma sensível redução no nível de reflectância e no contraste espectral, mesmo quando presente em quantidades insignificantes. (Meneses, 1976) Por sua vez, a maior facilidade de substituições de íons Mg^{2+} por íons de Fe^{2+} na estrutura da dolomita, conduz tanto à formação de óxidos de ferro, impregnado a rocha, como na geração de feições de

absorção próximas a $0,9\mu$ e $1,0\mu$. Além disso, as rochas carbonáticas são as mais susceptíveis à dissolução química por percolação de água meteórica, o que gera nas suas superfícies aflorantes formas erosivas bastante características e de graus variáveis de intensidades, conferindo-lhes padrões micromorfológicos bem típicos. É possível portanto, que a conjunção da presença dos menores constituintes da rocha e as microformas da superfície possam ser elementos de valor para uma discriminação dos tipos litológicos carbonáticos, a nível de imagem orbital.

Com este propósito de avaliação, tomou-se os dados TM em fitas magnéticas de uma pequena área da Serra do Ramalho, próximo a bom Jesus da Lapa (BA), que tem como aspecto mais importante uma excelente exposição de calcários e dolomitos, formando grandes pavimentos rochosos totalmente desprovidos de cobertura vegetal e solos. A área havia sido mapeada por Miranda et al (1976) nas escalas 1:50.000 e 1:2.000 para uma pequena porção, o que facilitava a comparação de unidades litoespectrais com as unidades litológicas.

2 - PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

Dentro de um módulo 512×512 pixels, com uma relação 1:1 pixel imagem-pixel vídeo, selecionou-se algumas áreas que representavam os melhores locais de exposição de calcários e dolomitos, para analisar espectralmente as bandas TM. A primeira análise feita, foi tomar os valores digitais de áreas de amostragem de diferentes fácies carbonáticas e com eles contruir uma curva espectral que graficamente representasse a variação da reflectância espectral das rochas em relação às bandas do TM. (Figura 1). Este procedimento é importante ao analisar-se individualmente as bandas TM, por causa da nossa deficiência visual de discriminar em imagens preto e branco uma variação tonal acima de 20 níveis de cinza.

Os pontos de amostragem nas imagens, para a construção das curvas de valores digitais espectrais da Figura 1, foram tomados como base no mapa faciológico de escala 1:2.000 de Miranda et al (1976), sobre unidades litológicas constituídas essencialmente de afloramentos

de rocha. Não se considerou para análise as unidades carbonáticas recobertas por solos ou vegetação. Na área de melhor exposição de rochas, Serra de Campo Alegre, (vide Figura 2 para referência), com uma dimensão de cerca de $6 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, aqueles autores distinguiram sete subfácies menores, agrupadas em quatro fácies maiores de calcários e dolomitos, e uma unidade de calcários pretos fétidos próximo às escarpas do Urucuia, esta possível de ser mapeada na escala 1:100.000. Devido as imagens estarem ampliadas na escala 1:50.000, pôde-se identificar com segurança, para posicionar os pontos de amostragem, apenas a localização de ocorrência de três das quatro fácies da Serra de Campo Alegre, além da unidade de calcários pretos. São essas quatro fácies carbonáticas, cujas composições litológicas estão descritas na legenda da Figura 1, que serviram para a análise de seus comportamentos espectrais nas bandas TM.

Pela Figura 1 verifica-se primeiro que as quatro fácies carbonáticas mostram no geral distintos valores de reflectância, a não ser na banda 4 onde ocorre superposição entre duas fácies. Contudo, o comportamento espectral destas litologias não segue o padrão de reflectância obtido de medidas radiométricas de laboratório que se conhece para as rochas carbonáticas (Figura 2). Invariavelmente, calcários e dolomitos puros exibem valores altos e uniformes de reflectância (sem bandas de absorção) até $2,0\mu$ e somente no intervalo de $2,0\mu$ a $2,5\mu$ é que ostentam intensas bandas de absorção devidas ao íon CO_3^{--} . Uma aproximação a este comportamento poderia ser obtido, se considerarmos que os altos valores de reflectância na banda 1 ($0,42-0,52\mu$) são provocados pelo forte espalhamento pela atmosfera da irradiância e radiância no comprimento de onda azul. Corrigido este efeito atmosférico, as curvas espectrais da Figura 1 passariam a ter individualmente, quase que um mesmo nível de reflectância, pelo menos até a banda 3 ($0,63-0,69\mu$). Isso pode ser visualmente constatado pela Figura 3, ao compararmos as quatro fácies indicadas nas imagens TM bandas 1, 2 e 3, com as suas curvas espectrais correspondentes. Observe por exemplo, que a fácies C2.2 é a mais escura em todas as três bandas.

Para a banda 4 ($0,76-0,90\mu$), um re-

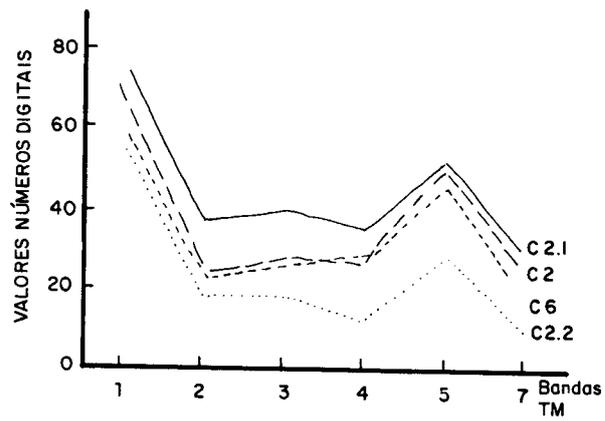


FIG. 1 - CURVAS DOS VALORES DIGITAIS DAS FÁCIAS CARBONÁTICAS C2.1- DOLOMITO C2-CALCILUTITO C 6-CALCÁRIO PRETO C2.2-CALCILUTITO ESCURO.

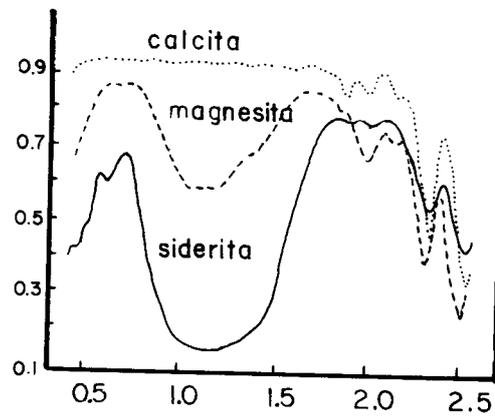


FIG. 2 - ESPECTROS TÍPICOS DE MINERAIS CARBONÁTICAS GAFFEY, (1987)

duzido abaixamento dos valores digitais em relação às bandas 1,2 e 3 (vide Figura 1), implica visualmente na imagem correspondente em tonalidades de cinza bastante escuras, embora sejam mantidas as diferenças de contrastes de reflectância observadas pelas curvas espectrais das quatro fácies carbonáticas. Dois fatores agem conjuntamente e que explicariam esse comportamento. Um seria a provável presença de minerais carbonáticos com absorções entre $0,76-0,90\mu$. Minerais como siderita (Fe_2CO_3), rodocrosita ($MnCO_3$), magnesita (Mg_2CO_3), são típicos exemplos de possuírem fortes bandas de absorção entre $0,8\mu$ a $1,0\mu$ (Gaffey, 1987), devido principalmente à presença do ferro. É muito frequente a substituição sólida entre os cations maiores dos minerais do grupo calcita, e o Fe pode substituir cations como de Mg^{+2} ou Mn^{+2} de todos os minerais deste grupo. As análises químicas de rocha das quatro fácies, para os óxidos MnO, Fe_2O_3 e F_2O_3 sempre confirmaram porcentagem próxima a 1%, que deve ser interpretado como indicativo da presença de alguns minerais como os anteriormente citados, ou de calcita e dolomita ferrífera. Inclusive, em alguns afloramentos localizados ocorrem sulfetos que dão formação a um material de alteração na superfície, semelhante a uma borra. O outro fator que deve ser considerado, não excluindo-se o primeiro, e que contribuiria para um abaixamento generalizado dos valores digitais não só para os alvos em análise mas praticamente para toda uma cena Landsat, é a direta influência dos valores de ganho e offset da banda 4, que procuram reduzir o excessivo contraste que a alta reflectância da vegetação (pico máximo nesta banda) exhibe em relação aos outros materiais. Isso evitaria que na imagem as áreas vegetadas aparecessem excessivamente claras, causando por exemplo o desequilíbrio de cores quando são processadas ampliações lineares de contraste para a obtenção de combinações coloridas a partir de três bandas. Consequentemente, os alvos que já mostram uma menor reflectância acentuariam mais ainda esse valor e tenderiam a exhibir baixas tonalidades de cinza em relação às outras bandas, como se pode observar para as rochas carbonáticas da Figura 3, banda 4.

Na banda 5 ($1,55-1,75\mu$) ocorre uma

acentuada elevação dos valores digitais de todas as fácies (Figura 1), o que em parte não se contrapõe ao comportamento espectral das rochas carbonáticas, desde que nesta banda não ocorrem feições de absorção. Esta elevação da reflectância aparece em todas as curvas espectrais que se levantou em campo e por estes dados poderia ser ela explicada como consequência de um contraste de reflectância provocado pela queda da reflectância em direção aos menores comprimentos de onda, a partir de $1,5\mu$. O que provoca essa queda é a presença na rocha de impurezas de óxidos de ferro ou sulfetos de ferro. Este mesmo comportamento também é exibido por quase todas as rochas silicáticas. Portanto, as variações tonais correspondentes às quatro litologias, como vistas na imagem da banda 5, Figura 3, deveriam ser creditadas às variações da intensidade de sombreamento causadas pelas correspondentes diferenças de intensidade das feições de lápies de cada fácies. Desta forma esta é a banda onde os efeitos do microrelevo melhor se revelam como um critério muito útil para discriminar as quatro unidades. A unidade C 2.2 que é a mais baixa em valores de reflectância, é a que possui as formas cárstica de lápies pontiagudo mais intensas (cerca de 4m de altura), com conseqüente maior sombreamento. No outro extremo está a fácies dolomítica C 2.1, com superfícies de rocha desprovidas de feições em lápies, formando na realidade, extensos pavimentos planos.

Na banda 7 ($2,08-2,35\mu$) é onde espera-se poder constatar as intensas bandas de absorção devidas ao radical CO_3^{--} , comuns a todas as rochas carbonáticas, independentes de seus grupos minerais (calcita ou aragonita). Os valores digitais da Figura 1 mostram que de fato isso ocorre para todas as quatro fácies carbonáticas. Como neste intervalo espectral da banda 7 ocorrem de fato bandas de absorção devidas exclusivamente ao radical CO_3^{--} , seria entre as bandas TM a que mais apropriadamente diagnosticaria o comportamento espectral de rochas carbonáticas. Assim, deve-se entender que as variações tonais vistas na correspondente imagem da Figura 3, estão mais diretamente relacionadas a um comportamento intrínseco da constituição mineralógica da rocha, do que a efeitos

do microrelevo. Sob tal consideração constata-se uma interessante observação, ao analisar-se a reflectância das litologias carbonáticas. A unidade C 2.1 que é essencialmente dolomítica possui um nível de reflectância mais elevada que as fácies calcárias quando o inverso seria esperado de ocorrer. O que explica tal comportamento foi conseguido ao se fazer uma análise da porcentagem de carbono orgânico total das rochas. Os calcários apresentavam % de C.O.T. superiores a 0,12% enquanto os dolomitos situavam-se abaixo de 0,8%, e é sabido que a matéria orgânica exerce uma redução na reflectância, sendo até um certo limite, maior a redução quanto maior for a % de C.O.T.. No caso das quatro unidades, medidas espectrorradiométricas de laboratório (Meneses, 1986), determinaram que a unidade C6, que possui os mais altos valores de % C.O.T. (\pm 0,15% a 0,17%), tem os mais baixos valores de reflectância, e essa mesma relação de % C.O.T. e reflectância comprovou-se para as outras três fácies. A razão da unidade C 2.2 (0,12% C.O.T.) aparecer na imagem com uma reflectância inferior à unidade C.6 é simplesmente por encerrar uma intensa micromorfologia de lápies o que provoca-lhe intenso sombreamento.

Na banda 7 a discriminação entre as fácies calcárias C6, C 2.2, C2, da fácies dolomítica C 2.1, é portanto devida a uma variação das suas porcentagens do C.O.T., que é da ordem mínima de 0,04%. Vê-se assim que variações muito pequenas de % de C.O.T. são extremamente significativas para a discriminação de fácies calcárias e destas para fácies dolomíticas.

Em resumo, as bandas infravermelhas são as que evidenciam melhor a constituição mineralógica e as microformas do relevo das rochas carbonáticas, sendo portanto o subconjunto de imagens TM que se deve selecionar para realização de processamento de realce de imagens digitais. Composições coloridas IHS com as bandas 4,5 e 7 na escala 1:25.000 realçaram perfeitamente as quatro fácies que foram analisadas em cada banda.

3 - CONCLUSÃO

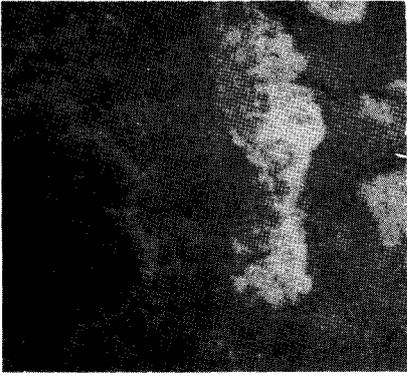
Para trabalhos de discriminação litológica mais detalhados, a boa resolução espectral das imagens TM compensa a

sua resolução espacial ainda relativamente grosseira. Isso porque as faixas espectrais cobertas pelas bandas TM permitem detectar a presença de importantes elementos presentes ou como constituintes mineralógicos ou impurezas menores. No caso de rochas carbonáticas, a presença de impurezas de óxidos de ferro inferior a 1% pareceu possível de ser diagnosticada na banda 4 e permitir discriminar algumas fácies, enquanto a suspeita da presença de matéria orgânica pôde ser percebida na banda 7, ao se constatar a inversão de reflectância entre dolomitos e carbonatos. A diferença espectral bem marcante entre as fácies calcárias e dolomítica está diretamente relacionada a uma diferença de apenas 0,04% do conteúdo total de carbono da matéria orgânica. A banda 5, onde os carbonatos não exibem qualquer feição de absorção, mostrou ser muito apropriada para combinar respostas espectrais de alvos de uma cena Landsat, de tal forma a realçar as variações de micromorfologia das superfícies.

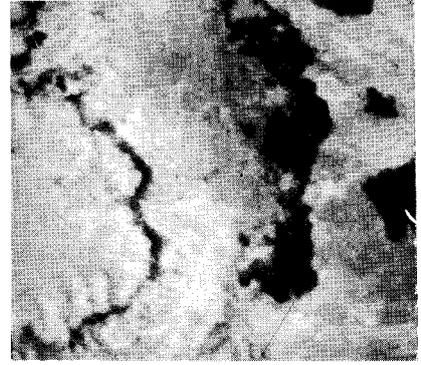
Três fácies carbonáticas discriminadas nas imagens TM concordam com boa precisão com unidades litológicas mapeadas na escala 1:2.000, o que comprova a grande eficiência das imagens digitais TM para mapeamentos de semidetelhe ou mesmo detalhe.

4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

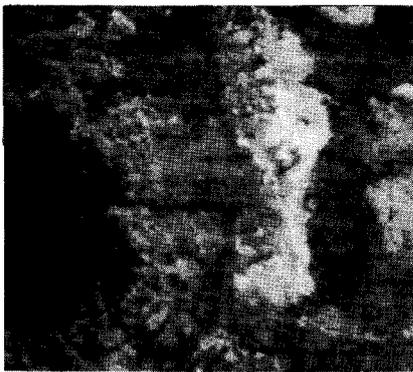
- GAFFEY, S.J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 μ m); Anhydrous carbonate minerals. *Journal of Geophysical Research*, 92:B2. 1429-1440.1987.
- MENESES, P.R. Avaliação e seleção de bandas do sensor "thematic mapper" do Landsat-5 para a discriminação de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semidetelhe. Tese de doutorado. USP, 233p. 1986.
- MIRANDA, L.L.F. de; MONTEIRO, M.D.; CAVALCANTI, I.C.C.; VALLE, C.R.O.; SILVA, J.C. Projeto Fluorita da Serra do Ramalho. Salvador, BA, SME-CPM, Vol.1, 97p. 1976.



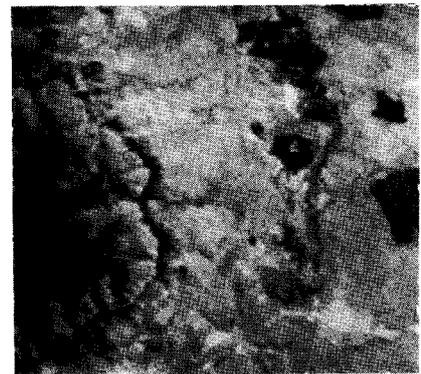
TM - BANDA 1



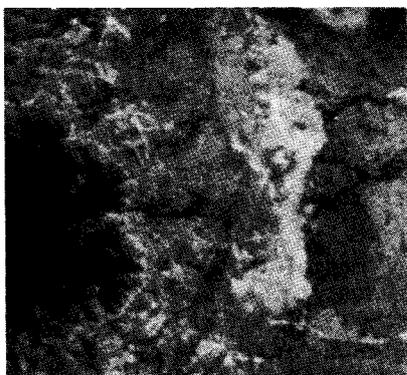
TM - BANDA 4



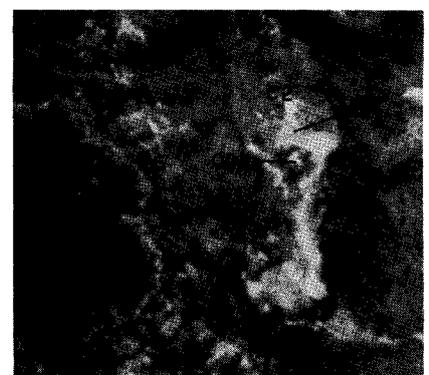
TM - BANDA 2



TM - BANDA 5



TM - BANDA 3



TM - BANDA 7

Fig. 3 - Bandas TM Landsat 5 da Serra de Campo Alegre - BA.
Escala original 1:50.000.