



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES / AUTHORS

Sensoriamento Remoto Programas LANDSAT e SPOT
Processamento Digital
Geologia

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

[Signature]
Luiz Gylvan Meira Filho
Coord. Geral Observ. Terra

AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR

[Signature]
Waldir Renato Paradella

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

[Signature]
José Carlos Neves Epifanio

CDU/UDC

528.711.7:621.376.5

DATA / DATE

Abril, 1991

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO	
	INPE-4828-PRE/1459	
<p>SENSORIAMENTO REMOTO E O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS EM GEOLOGIA</p>		
AUTORES/AUTHORSHIP	Waldir Renato Paradella	

ORIGEM
ORIGIN

DAT

PROJETO
PROJECT

GEOBOT

Nº DE PAG.
NO OF PAGES

29

ULTIMA PAG.
LAST PAGE

18

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Imagens de satélite tem sido utilizadas em investigações geológicas tanto no formato em papel como digital, através de fitas magnéticas. O uso cada vez mais intenso de computadores para análise dos dados digitais tem fornecido o ímpeto para o desenvolvimento do **Processamento Digital de Imagens**, um termo genérico para um conjunto de técnicas de manipulação de imagens que visa a efetiva extração de informação pelo usuário. O texto discute, de forma introdutória, aspectos gerais que envolvem o uso desta nova abordagem na investigação geológica no País.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Trabalho aceito para publicação na Revista Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	v
1 <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2 <u>CONCEITOS GERAIS</u>	3
2.1 - A radiação eletromagnética	3
2.2 - A integração da radiação com os alvos naturais	4
2.3 - Os Programas LANDSAT e SPOT	7
2.4 - A imagem digital	10
3 <u>REALCES NO DOMÍNIO ESPACIAL</u>	11
4 <u>REALCES NO DOMÍNIO ESPECTRAL</u>	12
5 <u>REALCES NO DOMÍNIO TEMPORAL</u>	14
6 <u>CONCLUSÕES</u>	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - O espectro eletromagnético	19
2 - A radiação eletromagnética e sua interação com a atmosfera ...	19
3 - Comportamento espectral de vegetação solos e água	20
4 - Comportamento espectral de rochas ígneas ácidas, intermediárias, básicas e ultrabásicas	20
5 - Composição colorida MSS, bandas 5 e 7, nas cores verde e azul + vermelho, respectivamente, da estrutura de Anhembi, Bacia do Paraná. A imagem à esquerda foi realçada por filtragem digital segundo NW'	21
6 - Composição colorida HRV-SPOT bandas 1, 2 e 3, nas cores azul, verde e vermelho do Vale do Rio Curaçá (subárea B no mapa da figura 8) Imagens realçadas por Ampliação Linear de Contraste	21
7 - Composição colorida TM-LANDSAT bandas 1, 5 e 7 nas cores azul, vermelho e verde, da mesma área da figura anterior. Imagens realçadas por Ampliação Linear de Contraste.....	23
8 - Unidades litológicas do Baixo Vale do Rio Curaçá	22
9 - Composição colorida MSS-LANDSAT, bandas 5, 7 e 8, nas cores azul, verde e vermelho da época seca (Vale do Curaçá, subárea A na Figura 8)	23
10 - Composição colorida da figura anterior usando-se imagens da época chuvosa	23

SENSORIAMENTO REMOTO E O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS EM GEOLOGIA

*Waldir Renato Paradella **

Imagens de satélite têm sido utilizadas em investigações geológicas tanto no formato em papel como digital, através de fitas magnéticas. O uso cada vez mais intenso de computadores para análise dos dados digitais tem fornecido o ímpeto para o desenvolvimento do *Processamento Digital de Imagens*, um termo genérico para um conjunto de técnicas de manipulação de imagens que visa a efetiva extração de informação pelo usuário. O texto discute, de forma introdutória, aspectos gerais que envolvem o uso desta nova abordagem na investigação geológica no País.

ABSTRACT

Orbital remote sensing data are available to geologic applications on a paper or on a digital format through computer compatible tapes. The current trend based on the use of computer to analyse digital data has provided the impetus for the development and consolidation of the *Digital Image Processing* of remote sensing data, a generic term related to a set of techniques available to the extraction of information from digital data. The paper discusses the general aspects of this new approach on the geological investigation.

* geólogo / pesquisador senior
INPE-S. J. Campos/SP-C.P. 515-12201

1. INTRODUÇÃO

Sensores em aeronaves ou satélites medem a quantidade de

energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre. Tais medidas são feitas em diferentes bandas espectrais, a intervalos regulares ao longo de uma linha, e o conjunto de linhas consecutivas forma uma imagem, devido ao movimento do satélite em relação ao planeta e à varredura do dispositivo sensor. Como estas imagens são numéricas por natureza, computadores podem ser usados para manipulação e realce de dados, visando uma melhor extração de informações do ambiente.

Dados codificados digitalmente passam a ser ideais à manipulação de uma grande quantidade de informação, que é comum em abordagens com sensoriamento remoto. Por exemplo, cada banda refletida do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite LANDSAT compreende 5700 linhas de 6900 pontos ou 262 Megabytes de dados coletados (Mather, 1987). Outras vantagens incluiriam a característica de repetitividade permitida pela análise digital, com precisão ao nível de brilho registrado, e a possibilidade de retificações e de abordagens em escala de detalhe, não permitidas com as imagens em papel. Por último, muitas das informações de interesse geológico nas imagens de sensores remotos são de natureza sutil e inviáveis para a extração e análise, sem um tratamento adequado por computador.

Por tais razões é que tem sido grande o desenvolvimento do Processamento Digital de Imagens de Sensores Remotos — PDISR, um termo genérico para um conjunto de procedimentos lógicos realizados por computador (algoritmos), que visam preparar uma imagem para a efetiva análise visual do fotointérprete, melhorar a fidelidade da cena ou extrair parâmetros estatísticos ou outros tipos de informações de interesse do analista. Por ser um assunto bastante específico, com uma quase ausência de literatura no

Pais, a discussão a seguir restringiu-se mais à conceituação geral, exemplificada por aplicações. Para os interessados no tema, recomenda-se o tratamento introdutório em análise digital dado por Novo (1989) e o artigo de Paradella (1990) que enfoca as principais técnicas de processamento digital em Geologia.

2. CONCEITOS GERAIS

2.1 A radiação eletromagnética

A luz solar é a forma de radiação eletromagnética mais familiar ao ser humano. A conversão no Sol de hidrogênio em hélio fornece a energia que é irradiada e atinge a superfície terrestre. Na superfície, parte é refletida pelos alvos e atinge a retina, a qual gera sinais elétricos que são retransmitidos para o cérebro pelo nervo ótico. Esses sinais são usados para construir a cena vista pelo observador, constituindo assim o processo de visão, que é análogo ao processo de sensoriamento remoto.

A luz é chamada visível, porque é detectada pelo olho, ao passo que outras formas de radiação eletromagnética, que viajam à velocidade da luz na forma de diferentes comprimentos de onda, não o são. A representação gráfica destas diferentes formas de radiação eletromagnética, em função de comprimentos de onda ou frequência, é denominada espectro (Figura 1). A maior parte dos sistemas sensores remotos orbitais em operação atuam na região do visível e infravermelho próximo, estando previstos, ainda na década de noventa, sistemas operacionais para a faixa de microondas.

Em imagens de sensoriamento remoto, a informação registrada, i.é., a Radiância (L), corresponde não somente à parcela da energia solar refletida na superfície e transmitida pela

atmosfera, mas também à radiação solar que é espalhada na atmosfera e atinge diretamente os detetores, ou seja:

$$L_{\lambda} = G_{\lambda} T_{\lambda} P_{\lambda} \phi + N_{\lambda} ,$$

onde λ denota a banda no espectro, G é um fator ligado à iluminação solar direta na superfície e à resposta do sensor, T é a transmitância atmosférica, P é a reflectância espectral, ϕ é uma função fotométrica dependente da posição do Sol e da orientação topográfica do terreno imageado e N é a contribuição da luz espalhada na atmosfera. Geralmente, em uma imagem de boa qualidade radiométrica, todos os outros parâmetros permanecem quase sempre invariáveis, sendo as variações presentes (gradações de cinza), ligadas em primeira ordem às diferenças de reflectância espectral da superfície e a efeitos de orientações topográficas do terreno, causando sombreamentos.

2.2 A interação da radiação com os alvos naturais

A radiação do Sol, que é refletida na superfície terrestre e é detectada nos detectores dos sensores, passa através da atmosfera duplamente: na sua trajetória do Sol para a Terra e, posteriormente, após a reflexão na superfície de volta para os sensores. Durante este processo ocorre a interação da radiação com partículas suspensas na atmosfera e com moléculas de gases; gerando espalhamentos e absorções (Figura 2). O efeito prático destes dois processos é adicionar um grau de bruma à imagem, i.é, reduz o contraste de alvos na cena e decresce a quantidade de radiação, retornando para o sensor da superfície terrestre. Dependendo do caso, a absorção é tão intensa que não permite a utilização de sensores remotos, particularmente nas faixas do espectro óptico de absorção por vapor d'água e gases.

Após interação com a atmosfera, a energia refletida entra

no campo de visada do sensor e é detectada e convertida em um valor numérico, que é transmitido para estações na Terra. A quantidade e a distribuição espectral da energia detectada é usada em sensoriamento remoto para inferir a natureza dos alvos na superfície. A hipótese básica assumida é que os alvos individualmente (rochas, solos, vegetação, água) possuem maneira peculiar de interagir com a radiação incidente, a qual é descrita pela resposta espectral daquele alvo. Se isto não ocorresse, seria impossível a utilização de sensoriamento remoto para a detecção e monitoramento de recursos naturais.

Do exposto anteriormente, deduz-se que o parâmetro chave na detecção de alvos por sensoriamento remoto orbital é a reflectância espectral, que depende dos processos de interação da energia e a matéria. Tais interações são realizadas ao nível macroscópico, reguladas pelas leis da óptica geométrica, e ao nível microscópico, descritas pela mecânica quântica e espectroscopia (Hunt 1980). Desta forma, um conhecimento geral de como os principais alvos naturais, tais como rochas, solos, vegetação e água, comportam-se ao longo do espectro eletromagnético, é fundamental quer para orientação na escolha do tratamento mais adequado, quer na interpretação das propriedades dos alvos expostas nas imagens. Na Figura 3 são mostrados os espectros gerais dos principais alvos naturais, para o intervalo do visível ao infravermelho, de maior uso em sensoriamento remoto.

De maneira geral, a curva espectral para uma vegetação verde, sadia, mostra picos e vales. A reflectância espectral para o intervalo do visível é controlada pelos pigmentos das folhas (carotenóides e clorofilas), responsáveis pelas absorções

presentes em 0,45 e 0,67 μm , respectivamente. Tipicamente, 70 a 90% da luz azul e vermelha absorvida fornece energia para o processo de fotossíntese. Isto explica a cor verde que se nota na cobertura vegetal. Já na região de 0,75 μm , a reflectância aumenta de valor e permanece mais alta ainda no infravermelho entre 0,8 a 1,35 μm . Isto é basicamente causado pela estrutura interna foliar. Finalmente, para a faixa restante até 2,5 μm , a resposta é controlada pelo conteúdo de água no tecido foliar. As características gerais sobre o comportamento espectral da vegetação é vital para abordagens geológicas via sensores remotos, posto que a resposta detectada provem de feições em superfície e quase 70% da superfície emersa do planeta é coberta, com maior ou menor intensidade, por vegetação, impedindo muitas vezes que as rochas e seus produtos de alteração sejam analisados diretamente.

Em relação aos solos, a textura, a rugosidade e a presença de umidade, óxidos de ferro, teor em argilo-minerais e matéria orgânica podem reduzir sobremaneira a resposta espectral para as faixas do visível e do infravermelho do espectro. Neste sentido, bandas de absorção na região do ultravioleta-azul, em 0,87 μm e na região de 2,0 a 2,5 μm , são indicativas da presença de íons ferrosos, férricos e hidroxilas, respectivamente.

Em relação a corpos d'água, a região do visível seria a de maior interesse na caracterização de propriedades, apresentando baixa reflectância entre 0,38 e 0,70 μm ($P < 0,10$) e absorvendo toda a radiação acima de 0,70 μm . Corpos com grandes quantidades de sedimentos em suspensão normalmente apresentam uma reflectância muito mais elevada que aqueles de água límpida.

Em relação a rochas, deve ser salientado que os principais

elementos formadores de minerais não possuem respostas diagnósticas, sendo que as variações de reflectância são causadas principalmente pela presença de constituintes acessórios como os íons de ferro, água, hidroxilas e minerais opacos. Na Figura 4 são mostrados campos ocupados por padrões de reflectância espectral para rochas ígneas ácidas, intermediárias, básicas e ultrabásicas. As rochas ácidas estão normalmente dispostas na parte superior dos gráficos, função da baixa absorção de energia incidente, alta transparência, elevada reflectividade de seus minerais félsicos e pouca presença de opacos. Já as intermediárias, localizam-se em campo intermediário, superpondo-se com o das ácidas. A reflectância das básicas tende a ser menor que a das ultrabásicas, devido ao seu maior conteúdo de opacos, situando-se ambas nos campos inferiores dos gráficos. No caso de rochas sedimentares e rochas metamórficas os padrões são mais variáveis, porém a presença de material argiloso, carbonoso e grafita tende a provocar uma diminuição geral da reflectância, de maneira análoga à presença de magnetita em ígneas.

2.3 Os Programas LANDSAT e SPOT

Os dados básicos utilizados na grande maioria das aplicações em sensoriamento remoto são referentes aos Programas LANDSAT e SPOT. Maiores detalhes sobre estes programas podem ser vistos em Richards (1986). Até 1982, os dados disponíveis corresponderam aos do sensor MSS (Multispectral Scanner), do satélite norte-americano LANDSAT, em quatro bandas espectrais, duas no visível e duas no infravermelho. Cada imagem MSS-LANDSAT corresponde a uma área no terreno de 185 x 185 km, obtida através de varreduras contínuas por um espelho, centrado perpendicularmente na trajetória ou órbita do satélite e que, acoplado a dispositivos

óptico-mecânicos, capta informações do terreno, em parcelas de seis linhas de varredura por oscilação. Nesta discussão, dois termos merecem atenção. Por ERT (Elemento de Resolução no Terreno) subentende-se a resolução espacial do sistema sensor, que pode ser expressa como a distância mínima entre dois alvos distintos permitindo suas detecções. Por pixel (picture element) considera-se o elemento de informação de imagem, medido em valores inteiros.

A área no terreno representada pelo ERT é determinada pela altitude do sistema sensor e por parâmetros intrínsecos, particularmente o campo instantâneo de visada (IFOV). O IFOV é o ângulo subentendido pela projeção geométrica de um detetor isoladamente na superfície, podendo ser definido angular ou linearmente. Já o pixel tem sua dimensão regulada pela taxa de amostragem do sistema sensor, i.é, pela distância entre medidas consecutivas de radiância da superfície, dentro do IFOV. No caso do MSS-LANDSAT, esta taxa de amostragem não é igual à dimensão linear do IFOV no terreno provocando superposições segundo a varredura, i.é, para um ERT de 79x79 metros tem-se um pixel de 79 x 57 metros.

Três satélites LANDSAT foram lançados pela NASA em 1972, 1975 e 1978. Cada um dos satélites contém varredores multiespectrais semelhantes e registram a informação através das mesmas bandas de sensibilidade. Os dados são então codificados em um sistema de 6 bits, i.é, cada pixel pode assumir um dos 64 níveis entre o mínimo e o máximo valor possível de detecção (0 = preto e 63 = branco). No MSS, cada linha de varredura comporta 2340 pixels e uma imagem é constituída por 3482 linhas. Na Tabela 1 são mostrados os principais parâmetros do MSS-LANDSAT.

Em 1982 foi colocado em órbita o satélite LANDSAT 4 com o sensor TM, que logo apresentou problemas de mau-funcionamento, sendo repostado, em março de 1984, pelo LANDSAT 5. Em vários aspectos, o TM representa uma extensão lógica do MSS. As quatro bandas ou canais multiespectrais foram agora ampliadas para sete no TM, com a inclusão de duas bandas no infravermelho refletido e uma no emitido. Em adição, as larguras espectrais foram diminuídas; a resolução espacial enfaticamente melhorada de 82 para 30 metros e a digitização acrescida de 6 para 8 bits, i.é, o intervalo dinâmico de gradações de cinza, entre o preto e o branco nas imagens, aumentou, originalmente, de 64 para 256 níveis de cinza. Na Tabela 1 são mostrados detalhes do imageamento do TM-LANDSAT.

O mais recente sistema operacional de sensoriamento remoto foi lançado em fevereiro de 1986, pela França, com a denominação de SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre). O SPOT-1 possui dois sensores HRV (*Haute Résolution Visible*) que podem ser ativados independentemente e operam em dois modos: um multiespectral e outro pancromático. No multiespectral, o terreno é imageado em duas bandas no visível e uma no infravermelho próximo, todas com 20 metros de resolução espacial, e uma banda larga, pancromática, com resolução espacial de 10 metros. O SPOT-1 apresenta como características inovadoras: (1) a viabilidade de visão oblíqua à trajetória (off-nadir); (2) a disponibilidade de estereoscopia e (3) imagens com elevada resolução espacial. Cada cena SPOT-1 cobre uma área de 60 x 60 km na tomada vertical. No caso de visadas oblíquas, com ângulos permitidos até 27°, a largura da cena na direção da órbita será sempre 60 km, ao passo que seu comprimento longitudinal será função do ângulo de visada

e variará de 60 km (nadir) a 80 km (\pm) 27° com visada para leste ou oeste em relação à órbita norte-sul. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características do imageamento SPOT-1.

2.4 A imagem digital

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional de intensidade luminosa $f(x,y)$, onde x e y referem-se às coordenadas espaciais e o valor f em qualquer ponto (x,y) é proporcional ao brilho, ou ao nível de cinza da imagem, naquele ponto. Já uma imagem denominada digital é uma imagem $f(x,y)$ que foi discretizada, i.é, tanto suas coordenadas espaciais quanto seus valores de brilho só assumem valores inteiros (Dutra et al. 1981). Assim, a imagem digital é formada, via conversão do sinal captado nos detetores (Radiância), em uma representação digital que possa ser manipulada por computadores. Este arranjo normalmente é expresso na forma matricial, onde índices de linhas e colunas identificam coordenadas x , y do ponto na cena, e o valor assumido pelo elemento da matriz identifica o valor do nível de cinza do ponto. Além das dimensões espacial e brilho que representam, a imagem engloba ainda dimensões espectral e temporal, posto que uma imagem representa uma banda no espectro de uma data específica. É sobre tal arranjo matricial multidimensional que é aplicado um grande conjunto de técnicas de FDISR, gerando novos arranjos de números que representam ou imagens melhoradas (realçadas) para análises visuais, ou mapas temáticos.

Desta forma, a informação contida nas imagens está relacionada com atributos do tipo : (1) **espectral** (gradações de cinza) diretamente vinculado com o comportamento espectral de alvos (rochas, solos, vegetação), importante na discriminação de litologias, etc.; (2) **espacial** (relações de forma e geometria da

superfície), fundamental em análise estrutural; (3) temporal, com consequência tanto no aspecto espectral (variações de tonalidade no tempo, ligada por exemplo à umidade, cobertura vegetal, etc.), como no espacial (diferentes situações de iluminação solar, gerando sombreamentos que facilitam a detecção de sistemas de falhas/fraturas, etc.). A seguir são ilustrados alguns exemplos de tratamento digital em aplicações geológicas, tomando-se por base os diferentes atributos da imagem.

3. REALCES NO DOMÍNIO ESPACIAL

Imagens LANDSAT e SPOT não-realçadas freqüentemente possuem sutis variações em brilho, as quais são de difícil percepção ao fotointérprete. Tais variações em brilho estão geralmente relacionadas com variações na iluminação da topografia, expressando feições geomórficas (relevo) e drenagem. De modo mais sutil ainda, lineações tonais podem também estar presentes, sem vinculações diretas com o relevo ou a drenagem; porém com significado estrutural (cobertura vegetal mais densa alinhada em zona de falha, etc.).

A informação espacial em uma imagem pode ser considerada como constituída de baixas e altas freqüências. Os componentes de baixa freqüência estão usualmente relacionados com áreas de respostas uniformes, as quais, no caso de imagens multiespectrais orbitais, representariam a informação mais ligada ao caráter espectral dos alvos. Já a informação associada às altas freqüências consiste nas mudanças de brilho, em curta dimensão espacial, que definem os limites do alvo (variações associadas a limites entre diferentes unidades litológicas, pedológicas, botânicas, etc., ou contrastes de feições de relevo entre áreas iluminadas versus sombreamentos); em síntese, variações abruptas

responsáveis pelos detalhes nas cenas.

No realce de linhas ou fotoestruturas em imagens digitais, busca-se aplicar realces (filtragens) que atenuem os componentes de baixa frequência e enfatizem os de alta frequência. Desta forma, uma imagem filtrada contribui de dois modos na fotointerpretação: (1) facilitando a extração de feições lineares mais evidentes e (2) realçando feições tênues, que poderiam passar despercebidas na análise visual da imagem original.

Existem vários processos de filtragens que realçam estruturas segundo direções preferenciais (NE, NW, EW, NS, isotrópico). Os filtros funcionam de tal modo que o valor digital de um pixel na imagem realçada é função não apenas do seu valor original, mas também da média de valores digitais originais de seus vizinhos, ponderada por pesos fornecidos pelo usuário.

Na Figura 9 são mostrados resultados do uso de filtragens direcionais segundo NW, aplicadas em composições coloridas MSS-LANDSAT da estrutura dômica de Anhembi/SP, na Bacia Sedimentar do Paraná. Na metade esquerda da cena é evidente o maior realce de lineações, particularmente para NW, quando comparado com a metade direita correspondente à composição colorida sem aplicação de realce por filtragem digital.

4. REALCES NO DOMÍNIO ESPECTRAL

Realces no domínio espectral são os resultados de transformações matemáticas aplicadas na imagem original que resultam em uma nova imagem, cujos valores digitais independam da influência da vizinhança entre pixels. Desde que a qualidade de uma imagem é uma medida subjetiva, não existem regras que acomodem os vários interesses na obtenção de uma única "melhor" imagem.

Frequentemente, vários produtos que enfocam tratamentos distintos, são necessários para que, combinados, componham a informação requerida pelo interessado. Assim, uma imagem realçada pode conter menos informação que a imagem original; porém o realce adequado mostrará a informação de maior importância para a análise posterior do fotointérprete.

No âmbito do realce espectral, várias técnicas são já consagradas em aplicações geológicas tais como, Ampliações de Contraste de Histogramas, Divisões de Bandas, Transformações por Componentes Principais, Decorrelação e IHS. Exemplos destas aplicações podem ser vistos em Almeida Filho (1984), Meneses (1986), Paradella (1986), entre outros.

Nas Figuras 6 e 7 são mostradas composições coloridas de bandas do SPOT e TM-LANDSAT, referentes ao Baixo Vale do Rio Curupá, norte da Bahia. As composições coloridas foram obtidas atribuindo-se cores aos canais previamente tratados por ampliações de contraste linear dos histogramas. As características geológicas da área enfocada podem ser vistas no mapa da Figura 8, correspondente ao retângulo menor (subárea B no mapa).

A importância da informação espectral pode ser constatada na análise destas figuras. Assim, na Figura 6, as regiões em escuro, correspondentes a unidades de micaxistos e elúvios arenosos grosseiros, são controladas em primeira ordem pela resposta de vegetação densa e seca da caatinga e subordinadamente por pavimentos constituídos por blocos de rochas ricos em óxidos de ferro, os quais causam grande absorção na resposta do terreno. Áreas correspondentes a mármore intercalados com filitos apresentam-se também com graduações escuras, mas não tão

intensas quanto às anteriores, pela presença de vegetação perenifólia e caducifólia, ao passo que áreas em vermelho e em branco, mapeadas como depósitos aluvionares, são controladas pelas respostas da cobertura vegetal densa perenifólia e das exposições arenosas, respectivamente.

O restante da figura engloba áreas mapeadas como gnaisses (biotita-hornblenda-gnaisses/hiperstênio-gnaisses) e migmatitos, com baixa densidade de cobertura vegetal. Apesar do caráter distinto dos solos destas unidades, com atributos mais vérticos (maior teor em argilo-minerais) para os relacionados com os gnaisses, a localização desfavorável no espectro das bandas do SPOT, não permite uma boa discriminação entre as unidades gnaissicas e migmatíticas, considerando-se somente o aspecto espectral (variações de cores).

Isto é mudado dramaticamente quando se analisa a composição colorida da Figura 7, onde os solos de gnaisses-granulíticos, ricos em Fe e OH⁻ (montmorilonita), causam feições de absorção intensas no visível e infravermelho médio, respectivamente, com a detecção pelas bandas TM 1, 5 e 7 (cor azul-escura na composição colorida). Deste modo, a utilização de tratamento digital, juntamente com noções sobre o comportamento espectral de alvos nas bandas consideradas no imageamento, fornece uma alternativa atraente em programas exploratórios, de cunho discriminativo ou, em condições favoráveis do ambiente, de inferências composicionais.

5. REALCES NO DOMINIO TEMPORAL

O imageamento periódico da mesma região pelos sistemas sensores orbitais permite que o terreno possa ser investigado e as informações extraídas, através de detecção de propriedades dos

alvos que mudam temporalmente. Em que extensão, os atributos temporais ou sazonais são valiosos em exploração geológica depende, obviamente, do problema enfocado e, mais importante, das características do ambiente.

As Figuras 9 e 10 são imagens realçadas do Vale do Curaçá (subárea A na figura 8), obtidas de imageamentos MSS-LANDSAT de duas passagens, em época seca (23/NOV/1978) e época chuvosa (21/FEV/1979). A diferença estimada de precipitação entre as duas passagens corresponde a 246 mm. Toda a sequência de tratamento digital resumiu-se a correções radiométricas e aplicação de realces por manipulação linear de histogramas.

A análise da imagem chuvosa revela marcantes diferenças em relação à época seca. Inicialmente, as tonalidades avermelhadas são dominantes e ligadas à vegetação caducifólia, com exceção de drenagens, i.é, com a chegada das chuvas, esta cobertura vegetal renasce e este comportamento responde pela alta reflectância no infravermelho e absorções pela clorofila, nas bandas do visível. As áreas escuras correspondem a áreas de cobertura vegetal ainda com vegetação seca, ao passo que as áreas azuladas (unidades gnaissicas) referem-se aos efeitos da umidade nos solos mais argilosos, com reflexões pouco mais elevadas no visível e grande absorção no canal MSS-7.

Do ponto de vista de discriminação litológica, o aspecto valioso da comparação entre estas duas imagens refere-se ao contraste entre áreas de solos argilosos ligados a hiperstênio-gnaisses e solos mais arenosos de quartzo-feldspato-gnaisses (padrões azulado-escuros versus esbranquiçado-roseos na borda inferior direita da Figura 10). Este contato não tinha sido mapeado nos levantamentos geológicos convencionais do Vale do

Curaçá, sendo detectado através de análise multisazonal com imagens MSS-LANDSAT (Paradella 1986). O fator umidade, em primeira ordem, e secundariamente a cobertura vegetal, seriam as causas das diferenças de respostas detectadas e que puderam ser exploradas em seu significado litológico.

6. CONCLUSÕES

Dados de sensores remotos têm sido coletados de maneira repetitiva em nosso território desde 1972 com o advento do programa LANDSAT. A perspectiva, com a operacionalização de novos sistemas como o SPOT e os de microondas como o RADARSAT, é que a nossa capacidade do uso efetivo desta quantidade brutal de informação esteja bem aquém do necessário. Em contrapartida, necessita-se de informações cartográficas básicas para a implementação de programas exploratórios que possam ter uma maior expectativa de sucesso em um setor de alto risco como a mineração e que possam traduzir em bem-estar para a sociedade, a um prazo relativamente curto. Neste contexto, o uso adequado da informação já adquirida e que estará no futuro disponível, passa necessariamente por uma atitude que integre o conhecimento do problema geológico focado com uma cultura mínima em sensoriamento remoto e em processamento digital. A exploração da informação espacial, espectral e temporal, no domínio digital e a integração com outros tipos de dados, através de sistemas georreferenciados, representa a tendência mais favorável para o sucesso, nos vários campos de atuação do geocientista, com o uso desta tecnologia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA FILHO, R. 1984 Sensoriamento remoto orbital aplicado à prospecção mineral em corpos graníticos das províncias

estaníferas de Goiás e de Rondônia: uma contribuição metodológica. São Paulo (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. USP), 158 P.

DUTRA, L. V.; SOUZA, R.C.M. de; MITSUO II, F.A.; MOREIRA, J.C. 1981 Análise automática de imagens multiespectrais. São José dos Campos, INPE, 40 P. (INPE-2212-MD/009)

HUNT, G.R. 1980 Electromagnetic Radiations: the communication link in Remote Sensing. In: Siegal and Gillespie (eds), Remote Sensing in Geology. New York. Wiley, 1980, cap. 2, p. 5-54.

MATHER, P.M. 1987 Computer Processing of Remotely-Sensed Images. New York. Wiley, 1989, p. 346.

MENESES, P.R. 1986 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 semi-detalhe. São Paulo (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP), 233 p.

NOVO, E. M. L. de M. 1989 Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. São Paulo. Editora E. Blucher Ltda. p.308.

RICHARDS, J. A. 1986 Remote Sensing Digital Image Analysis. New York. Springer-Verlag. p.275.

PARADELLA, W.R. 1986 O significado geológico da informação espectral e temporal (sazonal) de dados digitais MSS do satélite LANDSAT-3 para o Baixo Vale do Rio Curaçá, Bahia. Rev. Bras. Geoc.; 16 (2): 135-148.

PARADELLA, W.R. 1990 Introdução ao Processamento Digital de Imagens de Sensores Remotos Aplicado à Geologia. São José dos Campos, INPE, p. 45 (INPE-5023-RPE/616).

LEGENDA DAS FIGURAS

Figura 1: O espectro eletromagnético

Figura 2: A radiação eletromagnética e sua interação com a atmosfera.

Figura 3: Comportamento espectral de vegetação, solos e água.

Figura 4: Comportamento espectral de rochas ígneas ácidas, intermediárias, básicas e ultrabásicas.

Figura 5: Composição colorida MSS, bandas 5 e 7, nas cores verde e azul+vermelho, respectivamente, da estrutura de Anhembi, Bacia do Paraná. A imagem à esquerda foi realçada por filtragem digital segundo NW.

Figura 6: Composição colorida HRV-SPOT bandas 1, 2 e 3, nas cores azul, verde e vermelho do Vale do Rio Curaçá (subárea B no mapa da figura 8). Imagens realçadas por Ampliação Linear de Contraste.

Figura 7: Composição colorida TM-LANDSAT bandas 1, 5 e 7, nas cores azul, vermelho e verde, da mesma área da figura anterior. Imagens realçadas por Ampliação Linear de Contraste.

Figura 8: Unidades litológicas do Baixo Vale do Rio Curaçá.

Figura 9: Composição colorida MSS-LANDSAT, bandas 5, 7 e 8, nas cores azul, verde e vermelho da época seca (Vale do Curaçá; subárea A na figura 8).

Figura 10: Composição colorida da figura anterior usando-se imagens da época chuvosa.

Tabela 1: Principais parâmetros dos imageamentos MSS/TM-LANDSAT e HRV-SPOT.

O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

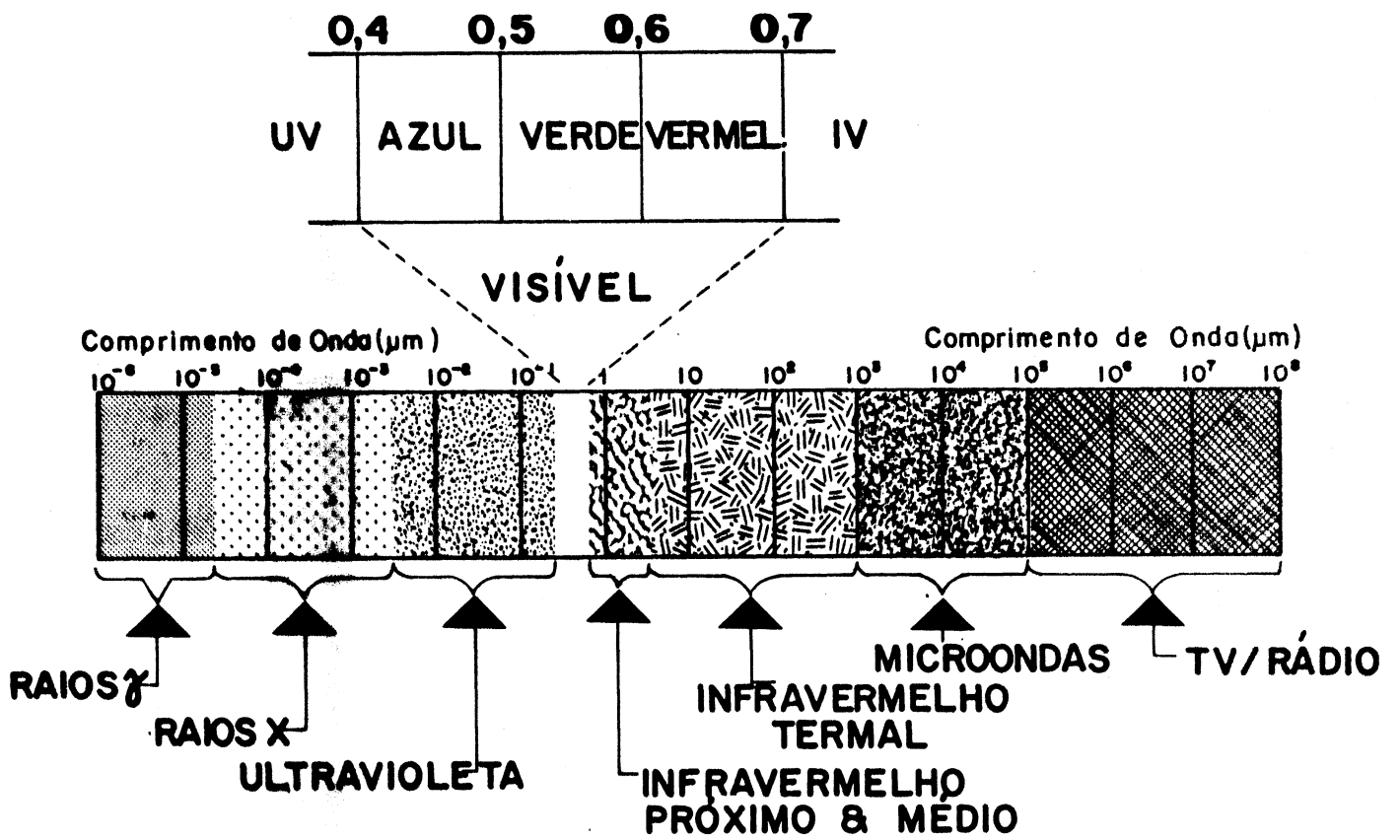


Figura 1

des. Coimbra/2010

EFEITOS ATMOSFÉRICOS

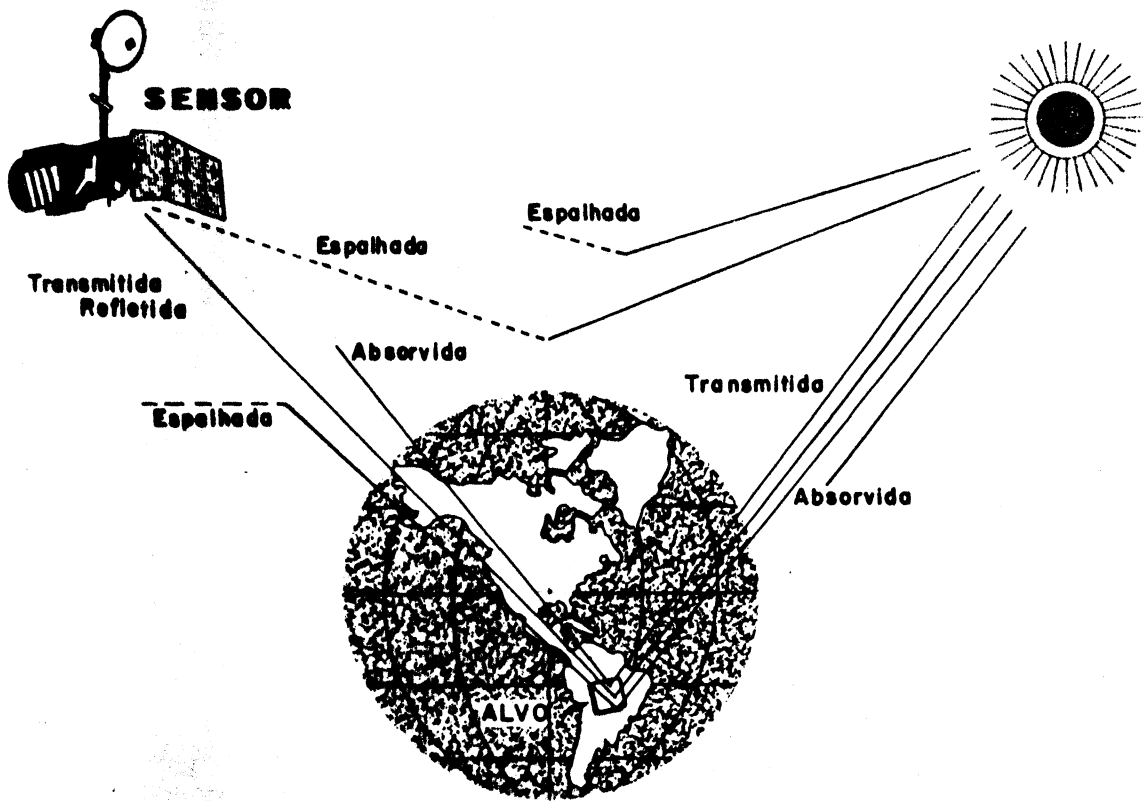


FIGURA 2

des. Coimbra/2010

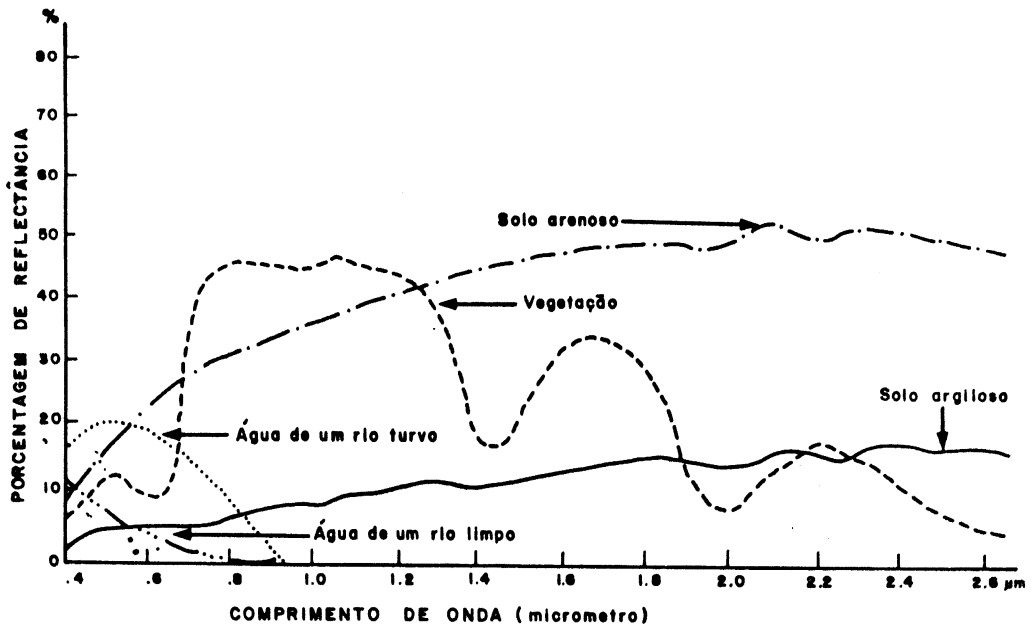


Figura 3

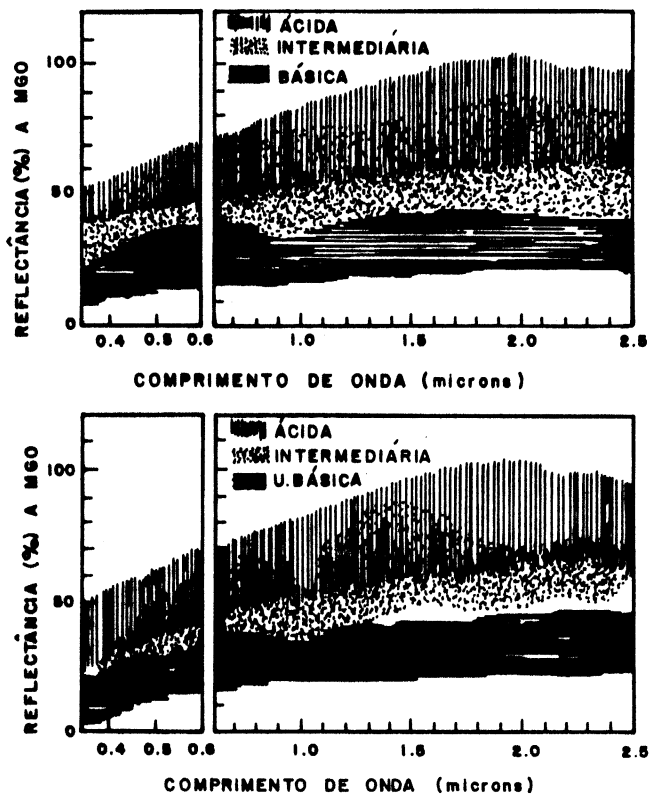


Figura 4

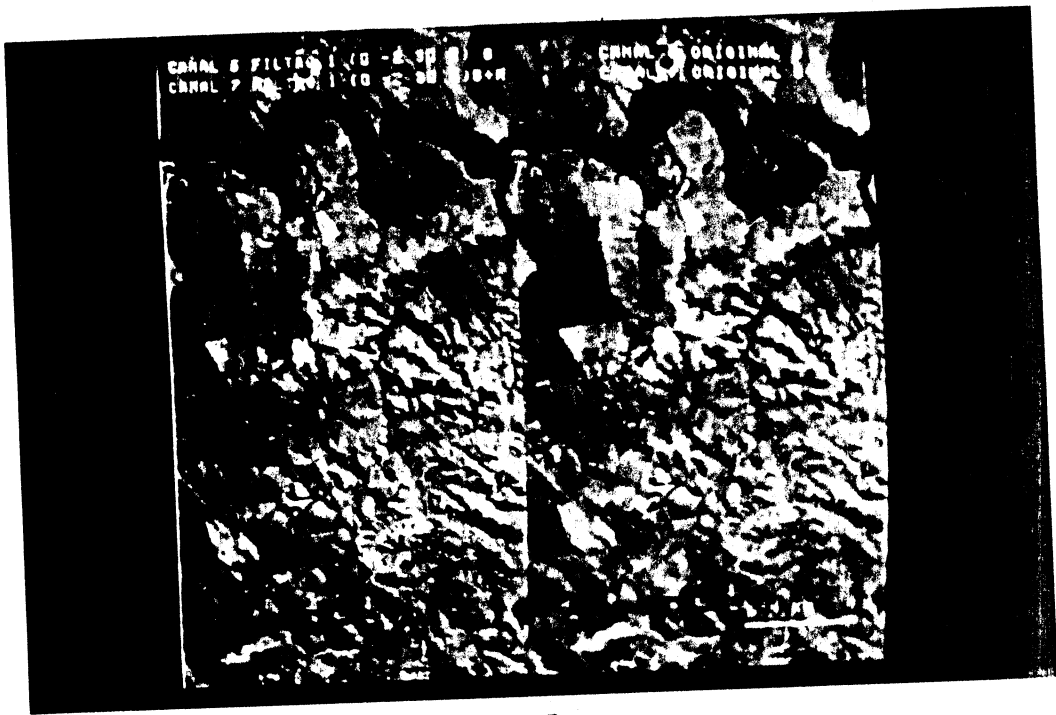


Figura 5

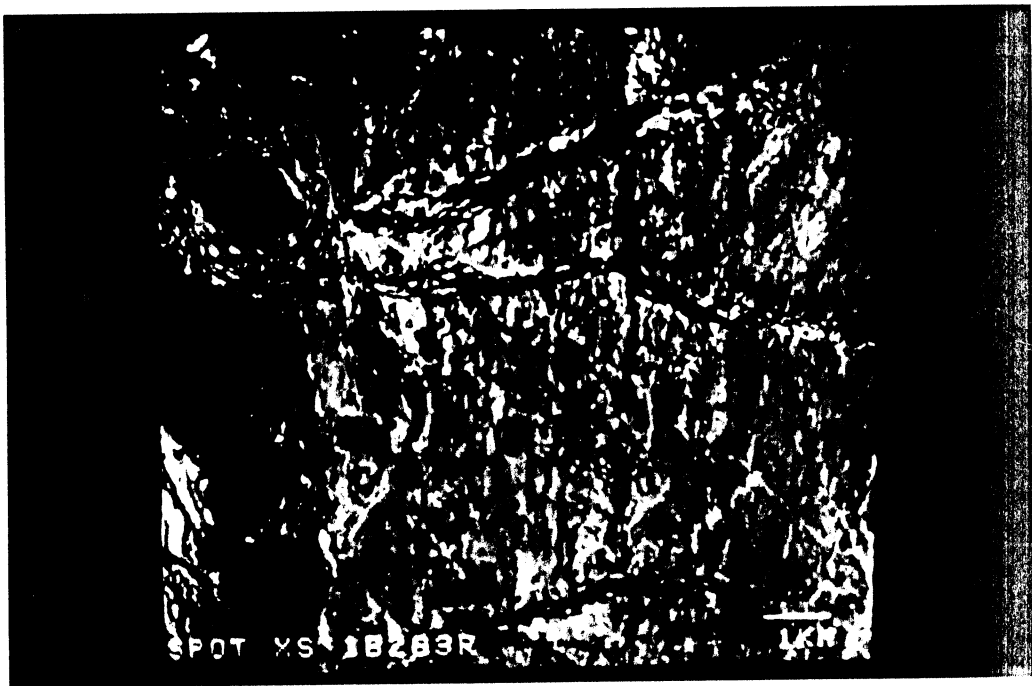
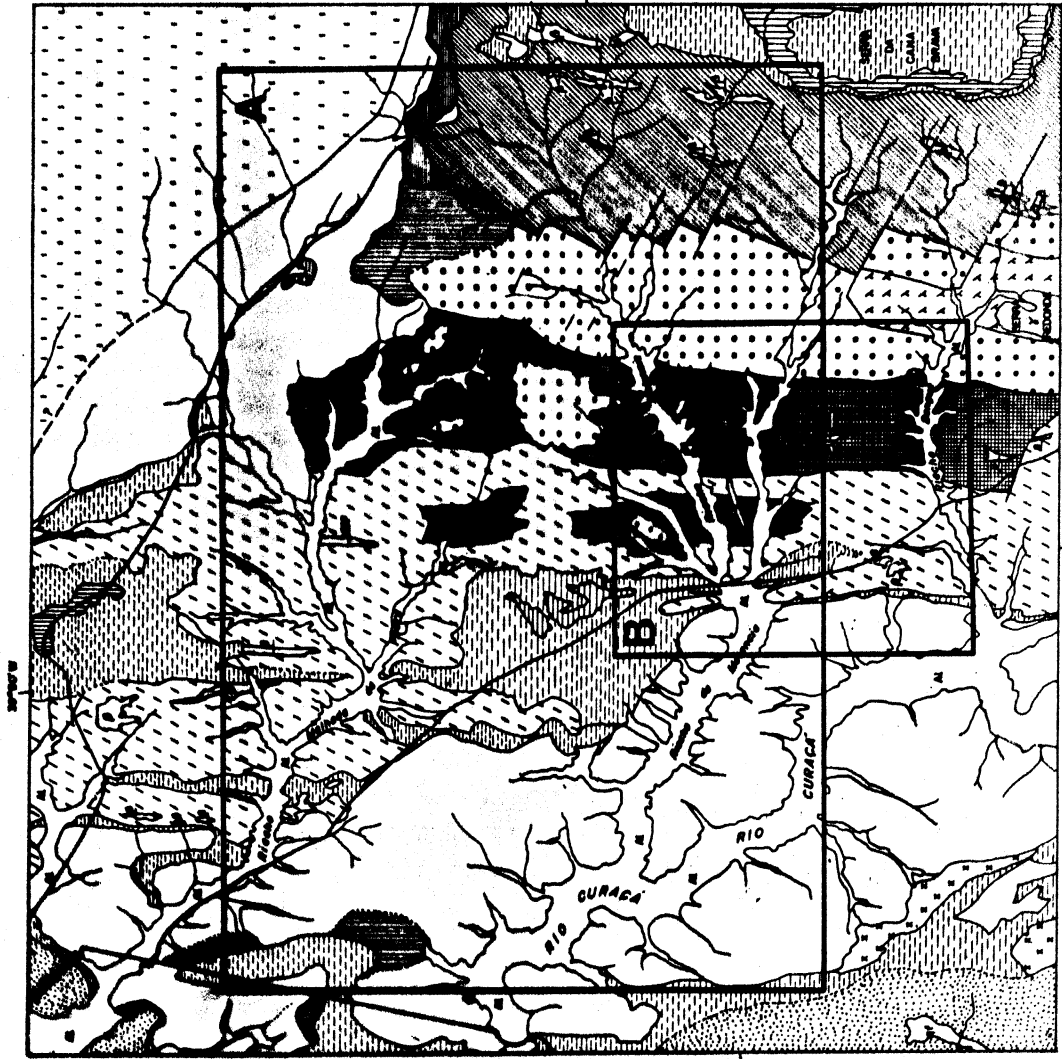


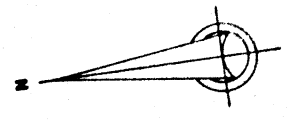
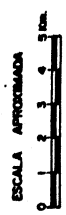
Figura 6

UNIDADES LITOLÓGICAS DISCRIMINADAS NO BAIXO VALE DO RIO CURAÇÁ, BAHIA, ATRAVÉS DE REALCES POR COMPUTADOR, DE DADOS DIGITAIS MSS-LANDSAT, INTEGRADOS COM DADOS PREVIOS(1) E DE CAMPO



LEGENDA

- AL. ALUVIONARES
- ELVA ARENOSA GROSSA
- CONCRETA ARENO-ARGILOSA CALCIFERA
- CALCÁRIO SECUNDÁRIO
- META-ARENAS E SUBORDINADAMENTE FILITOS
- FILITOS E CALCO-FILITOS
- MÁRMORES INTERCALADOS COM FILITOS/CALCO-FILITOS
- MÁRMORES/METACÁLCULOS
- META-ISTIOS GRANATÍFEROS E GNAISSES DE BAIXO GRAU
- GNEISS GNAISSICO
- METAAMFÍTO / METALMAMAFÍTO
- CALCOSILICÁTICAS
- QUARTZITO FERRUGINOSO
- QUARTZITO-FELDSPATO GNAISSES E QUARTZITO-FELDSPATO GRANADA GNAISSES
- GNAISSES HORNBLENDA GNAISSES COM INTERCALAÇÕES DELGADAS DE METAMAFITOS
- GNAISSES HORNBLENDA GNAISSES MACIÇAMENTE METAMAFITOS E COM INTERCALAÇÕES DELGADAS DE MAFITOS/ULTRAMAFITOS
- CALCILASTOS / BIOTITA AMEB GNAISSES
- METAAMFÍTO
- META-ARNAISSES / QUARTZITO-FELDSPATO GNAISSES SUBORDINADAMENTE METAMAFITOS / CALCOSILICÁTICAS
- CONTATO LITOLÓGICO
- FALHAMENTO
- ESTRADA



(1) PROJETO COBRE-CURACA / DELGADO E SOUZA, 1975.
MAPA GEOLÓGICO MSA-SUDENE / JORDAN, 1968, 1972; LENZE, 1972.



Figura 7



Figura 9

±



Figura 10

Varredor Multiespectral (MSS)**LANDSAT 1,2,3**

Canal	intervalo (μm)	Órbita: quase-polar, Sol-síncrona
4	0,5-0,6	altitude: 919km nominal
5	0,6-0,7	inclinação: 99,09°
6	0,7-0,8	período: 103 minutos
7	0,8-1,1	hora de passagem equatorial: 09:30

ciclo: 18 dias

Resolução espacial: 80 metros

Resolução radiométrica: 6 bits (64 níveis)

largura da órbita: 185km

Mapeador Temático (TM)**LANDSAT 4 e 5**

Canal	intervalo (μm)	Órbita: quase-polar, Sol-síncrona
1	0,45-0,52	altitude: 705km
2	0,52-0,60	inclinação: 98,2°
3	0,63-0,69	período: 99 minutos
4	0,75-0,90	hora de passagem equatorial: 09:45
5	1,55-1,75	ciclo: 16 dias
6	10,40-12,5	
7	2,08-2,35	

Resolução espacial: 30m (canal 6: 120m)

Resolução radiométrica: 8 bits (265 níveis)

largura da órbita: 185km

Sensor multiespectral (HRV)**SPOT-1**

Canal	intervalo (μm)	Órbita: quase-polar, Sol-síncrona
1	0,50-0,59	altitude: 832km
2	0,61-0,68	inclinação: 98,7°
3	0,79-0,89	hora de passagem equatorial: 10:30

ciclo: 26 dias

Sensor pancromático (HRV)

Canal	intervalo (μm)
1	0,51-0,73

Resolução espacial: 20m (multiespectral) em visada nadir
10m (pancromático) em visada nadirResolução radiométrica: 8 bits (multiespectral), 6 bits
(pancromático)

Largura da órbita: 117km (60km por HRV, 3km de sobreposição)

Campo de visada angular = 4,13°

Visada oblíqua = $\pm 27^\circ$ ($\pm 475\text{km}$ do nadir)

Tabela 1