



AUTORES AUTHORS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS	AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
	TRANSFORMAÇÃO RADIOMÉTRICAS REFLECTÂNCIAS TM/LANDSAT-5	<i>Ralf Gielow</i> Ralf Gielow

AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR	DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION	REVISADA POR/REVISED BY
<i>Cristina Maria Bentz</i> Cristina Maria Bentz	☐ INTERNA / INTERNAL ☒ EXTERNA / EXTERNAL ☐ RESTRITA / RESTRICTED	<i>Ícaro Vitorello</i> Ícaro Vitorello

CDU/UDC	DATA / DATE
528.711.7	Dezembro de 1990

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO	ORIGEM ORIGIN	
	INPE-5210-TDL/431	PG/DPA	
AUTORES/AUTHORSHIP	AVALIAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO RADIOMÉTRICA DOS DADOS TM/LANDSAT-5 EM REFLECTÂNCIAS	PROJETO PROJECT	
		SER	
		Nº DE PAG. NO OF PAGES	ULTIMA PAG. LAST PAGE
		VERSÃO VERSION	Nº DE MAPAS NO OF MAPS
Cristina Maria Bentz		172	A.6

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

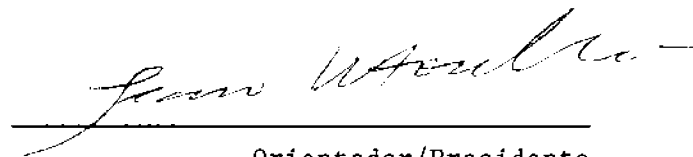
Os dados de sensores remotos estão sujeitos a uma série de efeitos radiométricos dependentes das condições ambientais e instrumentais particulares ao momento de aquisição das cenas. De modo a otimizar a extração de informações intrínsecas aos alvos, procura-se normalizar ou corrigir estes efeitos indesejados através de transformações radiométricas que aumentam a validade e compreensão dos resultados obtidos. Neste estudo, testou-se a transformação radiométrica dos valores digitais das imagens para reflectâncias aparentes e para reflectâncias corrigidas para os efeitos atmosféricos com um método que utiliza informações intrínsecas às imagens. Também verificou-se a estabilidade radiométrica do sensor TM/Landsat-5 no período de maio de 1984 a maio de 1986. Os resultados demonstraram que os números digitais e reflectâncias apresentam comportamentos distintos ao longo do espectro, sendo os espectros das reflectâncias corrigidas para os efeitos atmosféricos os que mais concordam com os valores de reflectância obtidos em levantamentos espectrorradiométricos de tempo. Os efeitos provocados por diferentes condições de iluminação e atmosfera foram reduzidos, mas não eliminados, e o sensor TM manteve-se com respostas estáveis.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, aprovada em 02 de março de 1990.

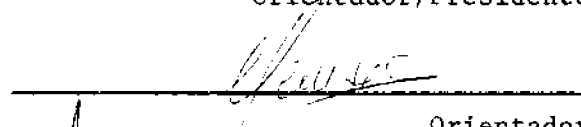
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Ícaro Vitorello



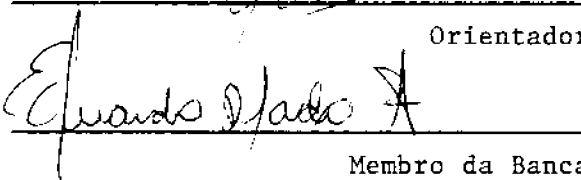
Orientador/Presidente

Dr. Paulo Roberto Meneses



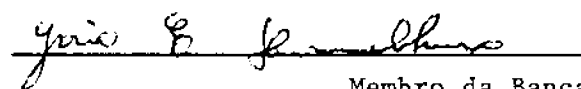
Orientador

Dr. Eduardo Delgado Assad



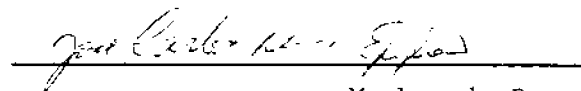
Membro da Banca
-convidado-

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro



Membro da Banca

Dr. José Carlos Neves Epiphânio



Membro da Banca

Candidata: Cristina Maria Bentz

São José dos Campos, 02 de março de 1990

AGRADECIMENTOS

Agradeço a pessoas e instituições que colaboraram no decorrer das várias fases desta dissertação, em especial:

- aos Drs. Ícaro Vitorello e Paulo Roberto Meneses pela orientação, apoio, estímulo e exemplo profissional.
- à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsas de estudo.
- ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) - Coordenadoria de Pós-Graduação - que forneceu os recursos para a execução das atividades.
- aos analistas e operadores do laboratório de tratamento de imagens do INPE pelo auxílio na parte computacional do trabalho.
- aos pesquisadores e colegas do Pós-Graduação do INPE pelas sugestões e estímulo.
- ao Professor Clóvis C. Carraro (UFRGS) pela motivação inicial para a área de sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Remote sensing data are subject to a series of radiometric effects dependent on environmental and instrumental conditions specific to the image acquisition moment. In order to optimize the extraction of target intrinsic information, it is sought to normalize or correct these unwanted effects by means of radiometric transformations which enhance the validity and comprehensibility of the obtained results. The present study tested digital value radiometric transformations from images to apparent reflectances and to atmospheric effect corrected reflectances by means of a method which uses image intrinsic information. The radiometric stability of TM/Landsat-5 sensor was also observed from May, 1984 to May, 1987. The results showed that digital numbers and reflectances present different behaviours along the spectrum. The spectra of atmospheric corrected reflectances are those that most agree with the values of the reflectances obtained from spectroradiometric field work. The effects due to different illumination and atmospheric conditions were reduced but not eliminated and TM sensor kept stable responses.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....</u>	7
2.1 - Imagens digitais TM.....	7
2.2 - Fontes de variação radiométrica das imagens TM.	9
2.2.1 - Calibração do sistema sensor.....	10
2.2.1.1 - Calibração absoluta.....	13
2.2.1.2 - Calibração relativa.....	23
2.2.1.3 - Pré-processamento dos dados TM.....	23
2.2.2 - Efeitos atmosféricos.....	25
2.2.3 - Efeitos da geometria Sol-alvo-sensor.....	31
2.2.4 - Efeitos da topografia.....	34
2.3 - Transformações radiométricas.....	36
<u>CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</u>	43
3.1 - Introdução.....	43
3.2 - Área de estudo.....	45
3.3 - Alvos selecionados.....	48
3.3.1 - Litologias.....	49
3.3.2 - Vegetação.....	54
3.3.3 - Água.....	57
3.4 - Dados digitais TM.....	58
3.4.1 - Transformação para valores de radiância.....	61
3.4.2 - Transformação para valores de reflectância...	63

3.5 - Considerações sobre as condições atmosféricas..	66
3.6 - Processo de análise preliminar dos dados.....	70
3.6.1 - Avaliação da estabilidade do comportamento espectral dos dados.....	71
3.6.2 - Avaliação da normalização dos efeitos atmosféricos com o método de Chavez (1988)...	72
3.7 - Processo de análise final dos dados.....	73
3.7.1 - Análise 1.....	74
3.7.2 - Análise 2.....	75
3.7.3 - Análise 3.....	76
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</u>	79
4.1 - Avaliação da estabilidade do comportamento espectral dos alvos.....	79
4.2 - Avaliação do método de Chavez (1988).....	81
4.3 - Resultados da Análise 1.....	107
4.4 - Resultados da Análise 2.....	113
4.5 - Resultados da Análise 3.....	117
<u>CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....</u>	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
APÊNDICE A - MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS AMOSTRADOS EM CADA BANDA ESPECTRAL, PARA CADA ALVO NAS CINCO DATAS, E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS APARENTES E CORRIGIDAS	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Esquema geral dos procedimentos envolvidos no estabelecimento da calibração absoluta de <u>sen</u> sores orbitais	14
2.2 - Precisão estimada para o estabelecimento da calibração absoluta do sensor TM	16
2.3 - Estabilidade radiométrica da banda MSS4: Landsat 1, 2 e 3	22
2.4 - Irradiância medida no topo da atmosfera e no nível do mar	26
2.5 - Principais processos de interação da REM com a atmosfera	27
2.6 - Pré-requisitos às correções radiométricas ...	37
3.1 - Mapa de localização da área de estudo	46
3.2 - Comportamento espectral do Alvo 1	50
3.3 - Imagem realçada de uma das áreas de estudo ..	52
3.4 - Comportamento espectral do Alvo 2	52
3.5 - Comportamento espectral dos calcários e <u>dolo</u> mitos	53
3.6 - Comportamento espectral do Alvo 3	54
3.7 - Comportamento espectral de folhas de espécie da vegetação	56
3.8 - Comportamento espectral de folhas de espécies do cerrado	56
3.9 - Comportamento espectral de águas fluviais <u>túr</u> bidas e de águas lacustres límpidas	58
3.10 - Pontos de amostragem para os Alvos 1, 2 e 3 (a) e para o Alvo 4 (b)	60

	<u>Pág.</u>
4.1 - Distâncias euclidianas (DE) entre as observações das Datas 1 e 4, expressas por reflectâncias aparentes e reflectâncias corrigidas para os Alvos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).....	82
4.2 - Distâncias euclidianas (DE) entre as observações das Datas 1 e 5, expressas por reflectâncias aparentes e reflectâncias corrigidas para os Alvos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).....	86
4.3 - Reflectâncias aparentes ($R \cdot 255$) para o Alvo 4 (vegetação) nas Datas 1 e 5.....	90
4.4 - Reflectâncias corrigidas ($R \cdot 255$) para o Alvo 4 (vegetação) nas Datas 1 e 5.....	90
4.5 - Números digitais estimados com o método de Chavez, a partir do número digital mínimo na Banda TM1 78, pelo modelo de atmosfera "clara" e pelo modelo de atmosfera "moderada".....	91
4.6 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM1, ao longo das cinco datas.....	93
4.7 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM2, ao longo das cinco datas.....	94
4.8 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM3, ao longo das cinco datas.....	95
4.9 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM4, ao longo das cinco datas.....	96
4.10 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM5, ao longo das cinco datas.....	97

	<u>Pág.</u>
4.11 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM7, ao longo das cinco datas.....	98
4.12 - Números digitais para o Alvo 1 nas Datas 1 e 5.....	99
4.13 - Números digitais corrigidos para o Alvo 1 nas Datas 1 e 5.....	100
4.14 - Reflectâncias corrigidas (R*255) para o Alvo 1 nas Datas 1 e 5.....	100
4.15 - Reflectâncias aparentes e reflectâncias corrigidas (R*255) para o Alvo 4 na Data 1.....	102
4.16 - Relação genérica entre números digitais e radiâncias.....	102
4.17 - Números digitais estimados pelo método de Chavez para a correção atmosférica nas Datas 1, 2, 3, 4 e 5.....	105
4.18 - Números digitais mínimos dos histogramas de cada banda para as Datas 1, 2, 3, 4 e 5.....	106
4.19 - Números digitais do Rio Corrente nas Datas 1, 2, 3, 4 e 5.....	106
4.20 - Coeficientes de variação dos conjuntos de observações expressas por números digitais (ND) e por reflectâncias aparentes (R) para os Alvos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5(e).....	109
4.21 - Números digitais para o Alvo 4 nas Datas 1 e 5.....	110
4.22 - Reflectâncias aparentes (R*255) para o Alvo 1 nas Datas 1 e 5.....	112
4.23 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 1.....	117

	<u>Pág.</u>
4.24 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 2.....	118
4.25 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 3.....	118
4.26 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 4.....	119
4.27 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 5.....	119
4.28 - Relação entre a radiância no detector e o número digital para as bandas TM/Landsat-5 processadas após 15/01/84.....	122
4.29 - Reflectâncias para os ângulos zenitais solares 50° e 33° que o número digital 80 assume nas bandas TM/Landsat-5.....	122
4.30 - Comportamento espectral do Alvo 1 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens e pelo espectro determinado em campo.....	124
4.31 - Comportamento espectral do Alvo 2 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens e pelo espectro determinado em campo	124
4.32 - Comportamento espectral do Alvo 3 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens e pelo espectro determinado em campo.....	125
4.33 - Comportamento espectral do Alvo 4 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens e pelo espectro do cerrado.....	125
4.34 - Comportamento espectral do Alvo 5 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens e pelo espectro de águas fluviais turbidas	126

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Datas das passagens analisadas e respectivos ângulos de elevação solar..	59
3.2 - Radiâncias espectrais Lmin e Lmáx para o TM	62
3.3 - Irradiâncias espectrais exoatmosféricas para o TM.....	63
3.4 - Distâncias Sol - Terra para os dias das passagens analisadas.....	64
3.5 - Ângulos zenitais solares calculados para as passagens analisadas.....	65
3.6 - Observações meteorológicas superficiais	67
3.7 - Condições atmosféricas e modelos de espalhamento associados.....	69
4.1 - Coeficientes de variação das observações nas 4 datas com condições de iluminação semelhantes (a) e nas 5 datas (b) expressas por reflectâncias aparentes e corrigidas...	80
4.2 - Números digitais para a correção atmosférica obtidos com o método de Chavez no histograma de cada banda e sobre o Rio Corrente.....	85
4.3 - "Off-sets" em números digitais para as bandas Landsat-5 após 15/01/84.....	103
4.4 - Radiâncias correspondentes ao número digital 1 nas bandas refletidas do TM.....	104
4.5 - Redução na variabilidade (%) entre os valores das Datas 1, 2, 3 e 4 e os valores da Data 5 após a transformação.....	113
4.6 - Razões Fc calculadas com as reflectâncias aparentes (Ra) e reflectâncias corrigidas (Rc) para cada alvo e banda TM.....	114

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O sensoriamento remoto orbital multiespectral iniciou-se em 1972 com o lançamento do primeiro satélite da série Landsat - ERTS-1 - posteriormente denominado Landsat-1. Nos anos subseqüentes, os sensores multiespectrais a bordo dos Landsat-2, 3, 4 e do atual Landsat-5, bem como os de outros sistemas orbitais, continuaram coletando dados da superfície terrestre, somando um grande número de observações.

Os dados de sensores remotos orbitais correspondem a valores de intensidades de radiação eletromagnética, em determinados comprimentos de onda, refletidas ou emitidas pelos alvos da superfície e pelos constituintes da trajetória no campo de visada do sistema. A estas intensidades de radiação eletromagnética são associados diferentes valores numéricos de brilho - onde 0 significa preto e 255 branco - que, convertidos em imagens de papel ou fitas magnéticas, são distribuídas à comunidade de usuários.

Por imposição de um uso mais imediato e com caráter aplicativo, os dados coletados foram amplamente distribuídos e aplicados generalizadamente a várias áreas de pesquisa, sem que maiores atenções fossem dadas à análise de suas grandezas e parâmetros físicos. Desta forma os procedimentos de análise e interpretação de dados de sensores remotos tornam-se, na maioria das vezes, puramente qualitativos, limitando-se ao conteúdo específico das cenas, onde os valores relativos dos números digitais são considerados suficientes. As técnicas numéricas mais comuns nos processamentos de imagens digitais, como realces e classificações, não utilizam diretamente as grandezas

físicas dos dados. Como consequência, a preocupação com a quantificação da grandeza radiométrica dos dados tem sido desconsiderada na maioria dos trabalhos de aplicação. São bastante recentes as investigações que analisam as transformações radiométricas que permitem a comparação dos valores digitais obtidos por diferentes sistemas de sensoriamento remoto, com diferentes condições ambientais, bem como as suas transformações em valores com significado físico, como radiâncias e reflectâncias.

Nos últimos anos, a necessidade destas transformações tem aumentado, na medida em que vão surgindo aplicações mais sofisticadas de sensoriamento remoto, visando a extração de informações quantitativas intrínsecas aos alvos estudados e o monitoramento destas informações por longos períodos de tempo.

O processo de recuperação da grandeza física dos números digitais normalmente envolve duas etapas. Na primeira, consideram-se as especificações técnicas do sistema sensor. Os números digitais são convertidos em valores de radiância e reflectância pela manipulação dos parâmetros de calibração próprios para cada banda. Os valores obtidos são denominados radiâncias e reflectâncias aparentes por serem valores medidos no topo da atmosfera, diferentes dos valores reais na superfície. Na segunda etapa, pretende-se corrigir radiometricamente os valores aparentes, compensando-se as alterações introduzidas pelas condições ambientais no momento da aquisição dos dados.

Infelizmente, as correções radiométricas dos efeitos atmosféricos, dos ângulos de iluminação e visada e dos efeitos topográficos são de difícil formulação e aplicação, devido à complexidade e ao interrelacionamento dos fatores envolvidos. Na maioria das vezes, não se dispõe dos dados e dos algoritmos necessários às correções,

restando como opção a utilização dos valores de radiâncias e reflectâncias aparentes, sem correções mais complexas.

Vários autores (Robinson, 1982; Middleton e Lu, 1982 e 1983; Price, 1987a) salientaram que, mesmo sem incluir algoritmos de correção, a transformação dos números digitais para radiâncias e reflectâncias aparentes, através da manipulação dos parâmetros de calibração dos sensores (comprimento de onda médio na banda, amplitude da banda, ganho e "off-set") traz vantagens a várias aplicações. Por princípio, ela torna mais fácil a caracterização e o monitoramento dos alvos em imagens que podem ou não ter sido obtidas pelo mesmo sensor, bem como a sua comparação com os dados obtidos em levantamentos espectrorradiométricos de campo e de laboratório. Também, em análises que envolvam múltiplas cenas - adquiridas com diversos ângulos de iluminação solar em função da sazonalidade - a conversão dos números digitais para valores de reflectância pode minimizar as variações provocadas por estas diferenças de condições de iluminação.

No entanto, persistem algumas dúvidas quanto à efetiva aplicação ou mesmo à validade de se utilizarem essas transformações mais simples, sem corrigir radiometricamente os dados das imagens com algoritmos mais complexos. Por exemplo, não se conhece com muito rigor até que ponto os valores de reflectância aparente recuperados dos números digitais são uma melhor representação do comportamento espectral intrínseco aos alvos, se não for aplicado algum tipo de correção efetiva para os efeitos atmosféricos.

Também questiona-se se a simples conversão dos números digitais para valores de reflectância contribui para minimizar variações relacionadas a diferentes condições de iluminação - uma vez que esta conversão não

leva em consideração as propriedades de reflectância bidirecional dos alvos. Outro fator determinante da validade destas transformações é a acurácia dos parâmetros de calibração utilizados. Se eles não forem atualizados e corrigidos para os possíveis desajustes que o sistema sensor tenha sofrido pelos efeitos de vibração no lançamento do satélite ou pela sua longa permanência no espaço, a transformação dos números digitais para radiâncias e reflectâncias perderá o sentido.

Dentro deste contexto, este estudo inclui uma revisão crítica dos vários fatores que interferem nas variações radiométricas das imagens TM, com o propósito de alcançar uma compreensão abrangente do problema e procura, sobretudo, testar a transformação radiométrica dos números digitais para reflectâncias e seus efeitos nos dados digitais TM/Landsat-5, com o objetivo de que seus resultados práticos possam auxiliar na escolha da grandeza a ser utilizada em análises quantitativas com dados de sensores remotos.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- 1 - avaliar as transformações dos números digitais para valores de reflectância (simples manipulação dos parâmetros de calibração) como minimizadoras da variabilidade provocada por diferentes condições de iluminação no comportamento espectral dos alvos, em análises de cenas multitemporais;
- 2 - verificar a estabilidade radiométrica, em órbita, do sensor TM/Landsat-5 no período de maio de 1984 a maio de 1987, procurando avaliar as restrições que variações inerentes aos sistemas de coleta de dados impõem na acurácia da identificação e monitoramento dos alvos em análises multitemporais;

- 3 - comparar os números digitais gravados nas fitas CCTs (Computer Compatible Tape) com os valores de reflectância que podem ser a partir deles recuperados, sem correções radiométricas mais complexas, para avaliar qual a relação entre os números digitais e reflectâncias das imagens e destes, com os valores de reflectância dos espectros de campo obtidos em trabalhos anteriores para os mesmos alvos.

Os procedimentos de aquisição e análise dos dados foram conduzidos de modo a minimizar as fontes de variação indesejadas. Assim, para atender a cada um dos objetivos selecionou-se um conjunto de dados onde varia o efeito que se quer monitorar, mantendo-se os demais constantes ou controlados.

Assim, selecionaram-se alvos homogêneos, de comportamento espectral razoavelmente conhecido e estável no tempo, para a extração de números digitais em cinco passagens diferentes do TM/Landsat-5, sobre a mesma área. Quatro destas passagens são do mês de maio dos anos de 1984, 1985, 1986 e 1987, apresentando condições ambientais semelhantes. A quinta passagem selecionada é do mês de outubro de 1984, para que fosse possível estudar o efeito de condições de iluminação diferente. Os números digitais foram transformados para radiâncias e reflectâncias aparentes, tomando-se os parâmetros de calibração específicos do TM/Landsat-5, para cada banda espectral. Como não se dispõe de dados de radiossondagem para os dias das passagens analisadas, a atenuação dos efeitos atmosféricos foi feita com um método que necessitasse somente informações intrínsecas às imagens. Utilizaram-se, também, observações meteorológicas de superfície para

avaliar as similaridades das condições atmosféricas nas diferentes datas.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

2.1 - IMAGENS DIGITAIS TM

O sensor imageador "Thematic Mapper" começou a operar a bordo do Landsat-4 lançado em 16/07/1982. Devido a problemas técnicos o Landsat-4 foi desativado um ano depois. Substituindo o satélite danificado, foi lançado em 01/03/1984, o Landsat-5, equipado com o mesmo sensor TM.

O TM é um avançado radiômetro eletro-óptico-mecânico destinado à obtenção de imagens de resolução espacial, espectral e radiométrica mais alta do que a do MSS. Opera simultaneamente em sete bandas espectrais, com uma resolução espacial equivalente a um elemento de resolução no terreno (ERT) de 30 m x 30 m, nas seis bandas do visível e do infravermelho refletido, e de 120 m x 120 m, na banda termal.

A radiação que chega ao sensor é dirigida para um espelho parabólico que a focaliza, através de um telescópio, sobre um conjunto de dezesseis detectores por banda do espectro refletido e quatro do termal, compondo uma matriz de cem detectores. Os detectores estão dispostos e orientados de maneira que sejam imageadas no terreno tantas linhas quantos forem os detectores existentes por banda. Em frente aos detectores estão as grades dicrônicas que limitam e decompõem a radiação em intervalos espectrais correspondentes a cada banda.

Ao incidir sobre os detectores, a radiação sensibiliza-os fazendo com que produzam um sinal eletrônico proporcional à energia incidente. Este sinal é então amplificado por um circuito eletrônico, convertido

linearmente de analógico para digital por um multiplexador e transmitido aos satélites TDRS (Tracking and Data Relay Satellite), para retransmissão às estações terrenas ou diretamente a essas.

No caso do Brasil, as fitas HDDT (High Density Digital Tape) gravadas na estação de rastreamento (Cuiabá-MT) são enviadas ao Laboratório de Processamento de Imagens em Cachoeira Paulista-SP, com valores digitais brutos que serão pré-processados radiometricamente, para a calibração dos dados, antes da distribuição aos usuários.

As imagens digitais são formadas por estes valores digitais pré-processados, gravados em fitas magnéticas compatíveis com o computador (fita CCT). São representações numéricas quantizadas dos valores de radiância correspondentes a cada área unitária imageada no terreno. A cada elemento de imagem que corresponde à área no terreno denomina-se pixel e, associado a cada pixel, há um número inteiro que representa a sua radiância.

Nas imagens TM o nível de quantização do sinal é de 2^8 (8 bits/pixel), ou seja, há possibilidade de serem discriminados 256 níveis de brilho por banda. Os recursos para isto são obtidos com instrumentos de tratamento automático de imagens tipo Sitim-150, através de um conjunto de programas que transforma essas imagens digitais em imagens analógicas coloridas. É nesta fase, que normalmente é excluída uma análise mais quantitativa do significado destes valores digitais em relação aos seus valores espectrorradiométricos. Normalmente, a análise desta imagem adquire um forte fator de análise visual.

2.2 - FONTES DE VARIAÇÃO RADIOMÉTRICA DAS IMAGENS TM

Estudos da cobertura terrestre (florestas, rochas, solos, etc.) geralmente têm como objetivo a obtenção de observações periódicas sobre uma mesma área geográfica ou sobre um mesmo tipo de alvo em áreas diferentes, para monitorar suas mudanças; ou identificar e discriminar o tipo e características da cobertura. Em ambas situações, a variável temporal introduz o inconveniente de que os dados a serem comparados, podem ser adquiridos por diferentes sensores sob diferentes condições ambientais.

Variações na transparência atmosférica, no ângulo de iluminação solar, na cobertura vegetal sazonal, etc., irão contribuir para aumentar as dissimilaridades nos comportamentos espectrais entre cenas de datas diferentes e, talvez, aumentar a variância de uma categoria particular de cobertura de uma cena para outra.

Idealmente deseja-se um conjunto de respostas espectrais independentes de variações das condições de aquisição das cenas, para cada tipo de cobertura, as quais possibilitem que se possa sucessivamente discriminá-las de outras. Para isto ser possível, tem-se de levar em consideração os fatores que condicionam em sensoriamento remoto a resposta do alvo, os quais produzem diferentes efeitos de variação radiométrica nas imagens.

Apesar dos efeitos radiométricos e seus métodos de correção já terem sido discutidos em várias publicações, são poucas as que apresentam uma abordagem integrada deste tema que facilite a sua compreensão. A maioria dos artigos enfoca tópicos específicos como os efeitos atmosféricos, ou variações devidas à geometria Sol-alvo-sensor, deixando lacunas na compreensão global do

problema e no interrelacionamento dos diversos fatores que interferem na aquisição, processamento e análise dos dados.

Encontra-se uma discussão ampla dos problemas radiométricos em Crane (1971), Slater (1985), Duggin (1985), Woodham e Lee (1985) e Teillet (1986).

Visando embasar teoricamente a discussão dos resultados do presente trabalho e aumentar a compreensão sobre o problema em si, discutem-se a seguir as principais fontes de variação radiométrica das imagens TM.

Sob o ponto de vista da análise de imagens, pode-se separar os principais tipos de variação radiométrica em duas categorias: os diretamente relacionados com o sistema sensor - calibração, "striping" - e aqueles relacionados com as condições ambientais no momento da aquisição da cena - efeitos atmosféricos, fatores da geometria de aquisição (topografia, ângulo de iluminação e visada) e características de reflectância dos alvos. Dentre estes, somente a reflectância é considerado informação desejada, sendo os outros considerados "ruídos".

2.2.1 - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA SENSOR

As variações nas imagens, dependentes do sensor, estão relacionadas com a calibração deste equipamento e com a estabilidade desta calibração durante a vida útil do sistema.

É na fase de calibração que se definem os parâmetros de calibração radiométrica que permitirão a recuperação dos valores de radiâncias e reflectâncias aparentes, a partir dos números digitais. Estes parâmetros são definidos antes do lançamento do satélite e deveriam

ser atualizados, periodicamente, enquanto o sistema permanecesse em órbita.

Slater (1985) destacou a importância dos parâmetros de calibração dos sensores, em análises que envolvam modelos de transferência de radiação da cena para a obtenção de informações quantitativas dos alvos como, por exemplo, a biomassa de uma floresta, a concentração de fitoplâncton no oceano, ou o tipo de solo e litologia de uma dada região.

Esses modelos, geralmente, prevêm qual será a radiância de um alvo de interesse, conforme os parâmetros fornecidos como entrada no modelo. No caso de coberturas vegetais, por exemplo, os parâmetros de entrada podem ser: a reflectância espectral das folhas, as propriedades da forma do dossel da cobertura, a reflectância do solo e a geometria de iluminação e visada. Para se determinar a radiância que chegará até o sensor, utiliza-se também um modelo atmosférico que defina as alterações sofridas na radiância determinada na superfície. Porém, na maioria das vezes o pesquisador está interessado no caminho inverso deste modelo. Dada uma irradiância, radiância aparente e geometria de visada, quais são as características da cobertura? Para responder a este tipo de questão tem-se que conhecer:

- o número digital registrado pelo sensor quando o alvo foi imageado;
- a calibração absoluta do sensor para transformar este número digital em radiância espectral aparente, e;

- um modelo atmosférico que relacione a radiância aparente de entrada do sensor, obtida no topo da atmosfera, com a radiância real do alvo na superfície.

Para correções radiométricas dos efeitos atmosféricos, topográficos e da geometria de imageamento das cenas, com modelos de reflectância dos alvos, a obtenção de valores de radiância e reflectância aparente com a manipulação dos parâmetros de calibração são indispensáveis, estando o sucesso da correção dependente da acurácia desta conversão. Os modelos matemáticos utilizados na correção dos efeitos radiométricos são formulados em unidades de radiância e reflectância espectral, pois não teria sentido desenvolver-se um modelo baseado nos números digitais, uma vez que variam de significado físico, conforme a calibração do sensor utilizado. Assim, antes de se aplicar qualquer tipo de correção aos dados das imagens, têm-se que transformá-los em valores absolutos, independentes do sensor utilizado na sua aquisição.

Price (1987b) demonstrou a importância dos parâmetros de calibração na determinação e comparação de índices de vegetação obtidos por diferentes sensores. Por exemplo, um alvo com índice de vegetação calculado pela razão MSS7/MSS5 (ND7/ND5) (sendo ND = número digital) de 1,48 para o MSS/Landsat-4, calculado com ND7 = 37 e ND5 = 25, terá um valor de 0,67, 1,46, 1,52 e 1,48 respectivamente para os MSS/Landsat-1, 2, 3 e 5, porque a radiância do alvo corresponde a diferentes números digitais para os outros sistemas Landsat, conforme for a calibração do sensor utilizado.

Visto que neste estudo serão analisadas especificamente imagens obtidas pelo TM/Landsat-5, a discussão que segue abordará os principais processos

envolvidos na calibração deste sensor com o objetivo de esclarecer os fatores envolvidos no estabelecimento desta calibração, bem como na sua aplicação aos dados digitais que chegam aos usuários das imagens digitais.

Uma ampla classificação dos processos de calibração radiométrica foi apresentada por Biggar et al. (1986) e Slater (1984) que revisaram os principais problemas e métodos envolvidos. A principal divisão é feita em termos de calibração absoluta das respostas radiométricas e calibração relativa, ambas abrangendo o problema da compensação da resposta entre detectores, entre bandas e variações sistemáticas dos dados.

2.2.1.1 - CALIBRAÇÃO ABSOLUTA

A calibração absoluta é feita com o objetivo de manter a correspondência entre os valores digitais gravados nas fitas e a radiância que chega ao sensor.

Os principais procedimentos envolvidos na calibração de sistemas orbitais como o Landsat (TM) e Spot (HRV) podem ser separados em duas fases ordenadas (Slater, 1985):

- 1) Calibração pré-lançamento.
- 2) Calibração com o sistema em órbita.

Na Figura 2.1 tem-se uma visão geral da seqüência dos procedimentos que são discutidos a seguir.

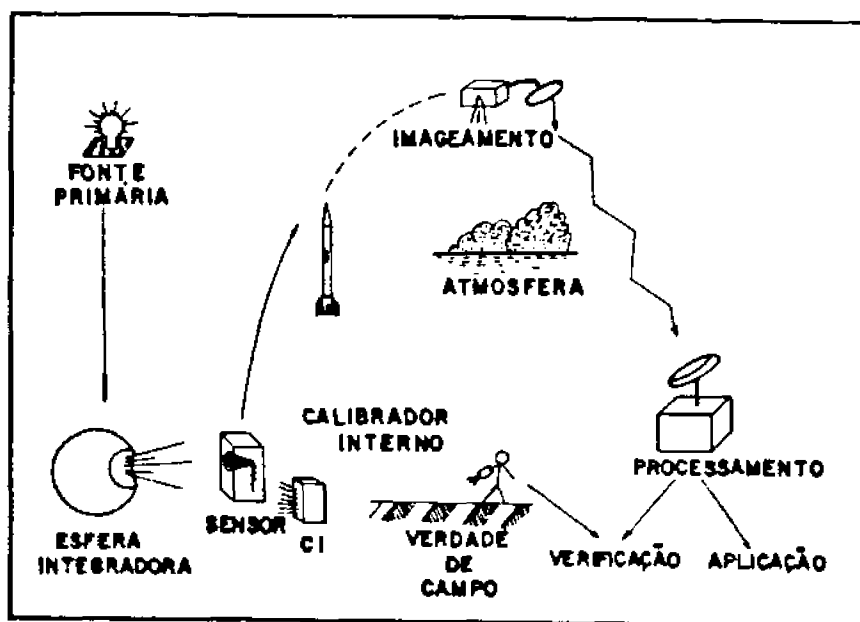


Fig. 2.1 - Esquema geral dos procedimentos envolvidos no estabelecimento da calibração absoluta de sensores orbitais.

FONTE: Adaptada de Price (1987a).

a) Calibração pré-lançamento

Nesta fase são calibrados os detectores e o calibrador interno do sensor TM. Objetiva-se atingir as especificações radiométricas quanto à faixa dinâmica, sensibilidade e acurácia. A faixa dinâmica constitui um dos parâmetros que definem a sensibilidade espectral de operação do sensor. No caso do Landsat, a faixa dinâmica das bandas espectrais foi especificada de maneira a cobrir os níveis de radiância dos alvos terrestres. A sensibilidade diz respeito à razão sinal/ruído, e a acurácia é a precisão absoluta exigida no processo de calibração. No caso do TM, esta precisão é de 1% entre detectores, 2% entre bandas e 10% em todo o processo de calibração absoluta.

A calibração estabelecida nesta fase é de grande importância, porque o TM não observa alvos extraterrestres de radiância conhecida, como o Sol, por exemplo, para monitorar o seu funcionamento em órbita. Conta, para tanto, com um sistema de calibração interna, feita a partir de calibrações absolutas pré-lançamento.

Usualmente a calibração em laboratório de sensores que operam no visível e infravermelho próximo, utiliza uma esfera integradora como fonte secundária, que por sua vez é iluminada por uma lâmpada de radiância padrão do NBS (National Bureau of Standards). Uma esfera integradora, com diâmetro de 1,22 cm de abertura, é utilizada para se obter uma resposta suficientemente uniforme na entrada do sensor TM.

O processo consiste na comparação entre os valores conhecidos, fornecidos pela esfera integradora, e os valores lidos pelo TM. Assim, pode-se determinar os ganhos e "off-sets" para cada detector em uma escala absoluta. As radiâncias padrão foram transferidas sucessivamente da fonte primária (lâmpada NBS) à esfera integradora, ao plano focal do TM e destes ao calibrador interno. Os detectores foram utilizados como instrumentos de transferência na calibração do calibrador interno.

A precisão com que cada passo desta transferência foi efetuada pode ser observada na Figura 2.2. Começando com uma incerteza de 1,3% na escala de radiância da fonte primária, seguem 1%, 2% e 3% de incerteza, associadas a cada passo da transferência. Daí resultam 4,1% de incerteza até o calibrador interno.

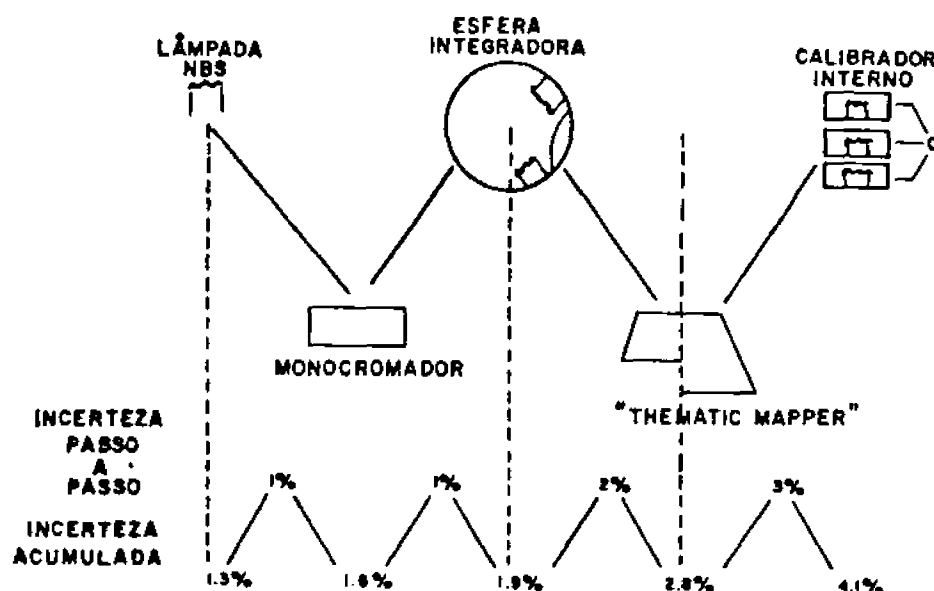


Fig. 2.2 - Precisão estimada para a transferência da calibração absoluta do TM.

FONTE: Adaptada de Barker et al. (1985a).

É bom ressaltar que esta incerteza está relacionada à precisão da transferência dos níveis de radiância padrão e não à precisão total do processo de calibração. Barker et al. (1985a) estimaram uma precisão de 10% para a calibração pré-lançamento a qual é compatível com as especificações da NASA (National Aeronautics and Space Administration).

O sensor (HRV) (High Resolution Visible) SPOT também foi calibrado com procedimentos similares que estão relatados em Slater (1984). Maiores detalhes sobre a calibração pré-lançamento do TM/Landsat-5 podem ser encontradas em Barker et al. (1985a), Barker et al. (1985b) e Biggar et al. (1986).

Os sistemas orbitais são projetados para operar regularmente durante a sua vida útil, mantendo-se estáveis em relação à calibração estabelecida antes do lançamento. Entretanto, com o lançamento, os sistemas estão sujeitos a uma série de fatores desestabilizantes como desajustes mecânicos, anomalias eletrônicas e contaminação da parte óptica e dos filtros.

Segundo Slater (1984), a forte vibração durante o lançamento pode causar deslocamentos sutis entre espelhos, filtros e detectores, insuficientes para comprometer o funcionamento geral do sistema, mas suficientes para comprometer a sua calibração absoluta. De menor efeito, são as anomalias eletrônicas que geralmente têm magnitude de poucos números digitais e podem facilmente ser minimizadas pelos pré-processamentos aplicados aos dados brutos em terra.

Talvez o principal fator desestabilizante da calibração no espaço seja a contaminação da parte óptica do sistema. O intervalo de frequência de um filtro pode variar na medida em que seu índice de refração for alterado pela deposição de água condensada nos seus espaços vazios. Da mesma forma, a transmissão das lentes e a reflectância dos espelhos são alteradas pela deposição de impurezas e pela própria deterioração das superfícies. Estas impurezas formam uma camada de resíduos com alta absorção à radiação ultravioleta e à radiação visível de maior energia (Slater, 1984). Um bom exemplo de degradação da parte óptica foi o sistema de calibração solar a bordo do Landsat-1. O espelho que dirigia a radiação solar ao sistema óptico contaminou-se de tal maneira que, depois da 21^o órbita, os sinais variavam 76%, ao contrário dos 7% previstos em testes antes do lançamento, isto para as bandas MSS7 (0,8 a 1,1 μm) e MSS4 (0,5 a 0,6 μm) (Horan et al., 1974). Outro exemplo de contaminação do sistema óptico foi o Coastal Zone Color

Scanner (CZCS) que, durante os quatro anos de funcionamento, apresentou um decaimento de 60% a 70% nas bandas de comprimentos de onda menores (Slater et al., 1987).

b) Calibração com o sistema em Órbita

Devido à instabilidade da calibração pré-lançamento, é necessária a calibração com o sistema operando no espaço. Esta calibração visa verificar o funcionamento do sistema nas novas condições ambientais, permitindo a atualização dos parâmetros de calibração determinados em terra.

Uma maneira seria a utilização do Sol, ou mesmo da Lua, como fonte de radiância padrão no espaço. No entanto, além dos problemas de contaminação, também não se conhece a irradiância solar no topo da atmosfera com a precisão necessária.

O TM conta com um calibrador interno que seria responsável por fornecer valores padrões de radiância para a calibração em órbita. Para tanto, assumir-se-ia a estabilidade do calibrador interno desde o lançamento do sistema e nas novas condições de vácuo, com irradiação de raios cósmicos e ausência de gravidade.

O calibrador interno a bordo do TM consiste de um braço óptico-mecânico que possui na sua parte superior três lâmpadas miniaturas para calibrar as bandas refletidas e um corpo negro, para a banda termal. O braço oscila na mesma frequência do espelho imageador bloqueando a entrada de radiância da cena aos detectores, durante os 10,7 ms nos quais o espelho se prepara para imagear mais uma linha. Nestes 10,7 ms, inserem-se em frente aos filtros

diferentes níveis de radiância conhecidos, calibrados de acordo com os procedimentos de pré-lançamento.

Na prática, o que se tem observado é que os detectores são mais estáveis do que o calibrador interno destinado a calibrá-los. Singh (1985) detectou para algumas bandas, especialmente a banda TM3 do Landsat-5, uma variação de 20% entre os ganhos dos detectores pares e ímpares na região de calibração ("cal wedge") após o lançamento. Uma variação desta ordem não poderia ser atribuída somente ao mau funcionamento dos detectores. Após a análise cuidadosa dos dados, o autor relacionou as variações observadas com algum tipo de problema no calibrador interno. Uma hipótese para explicar este problema seria a contração do braço do calibrador interno devido às baixas temperaturas orbitais. Desta forma, os detectores do TM seriam iluminados com visadas diferentes das especificadas em terra. Assim, mesmo que as lâmpadas do calibrador interno não tenham se alterado, valores desconhecidos de radiância estão chegando aos detectores, o que invalida a sua utilização como calibrador interno. Singh (1985) desenvolveu um algoritmo de extração de pulso de calibração para contornar o problema. Entretanto este algoritmo solucionaria o problema somente em uma escala relativa, não sendo possível avaliar o seu efeito em uma escala absoluta.

Outra deficiência no uso do calibrador interno é que ele não monitora variações na transmitância da óptica de formação da imagem, verificando somente os filtros, detectores e a parte eletrônica.

Devido a estes problemas com o uso de calibradores internos, tanto a NASA (National Aeronautics and Space Administration) como o CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) estão utilizando áreas terrestres de

referência para a calibração dos sistemas em órbita (Slater, 1984).

Este tipo de calibração utiliza, simultaneamente, medidas radiométricas de campo do alvo de referência e da atmosfera. Se as condições atmosféricas forem determinadas para o momento exato da passagem do satélite, sobre uma área de reflectância conhecida, estes dados podem ser utilizados em modelos atmosféricos de transferência de radiação para prever a radiância que chega ao sensor. A relação entre a radiância prevista e os valores digitais provêem a calibração absoluta do sistema sensor.

A vantagem deste tipo de procedimento é que ele leva em consideração todas as fontes de variação do sinal, já que ele é feito nas condições normais de operação do sistema.

A principal limitação na aplicação deste método é a dificuldade de se determinarem os parâmetros atmosféricos necessários com uma precisão satisfatória, no momento da passagem do satélite. Outra limitação é a necessidade de se trabalhar com cenas que contenham áreas amplas e uniformes de alta reflectância. Os corpos d'água, por exemplo, muitas vezes têm tamanho e uniformidade suficiente para serem utilizados como alvos padrão; no entanto a sua reflectância é muito baixa para cobrir a faixa dinâmica do sensor e oferecer valores com boa precisão.

Felizmente, áreas amplas, uniformes e de alta reflectância existem, com ocorrência predominante em regiões áridas como, por exemplo, White Sands no Novo México (EUA). Esta região de areias gipsíticas tem sido utilizada para avaliar e atualizar a calibração

radiométrica absoluta dos sensores MSS/Landsat-1 (Nelson, 1985b) e MSS/Landsat-2, 3, 4 e 5 (Markham e Barker, 1987), do TM/Landsat-4 (Castle et al., 1984) e, mais recentemente, do TM/Landsat-5 (Slater et al., 1987). Ela oferece um alvo amplo e uniforme, de reflectância aproximadamente lambertiana para os ângulos solares de interesse, e baixa concentração de aerossóis para dias com pouco vento, simplificando os cálculos de transferência da radiação.

Os resultados demonstram que a calibração radiométrica dos sensores MSS/Landsat-1, 2, 3, 4 e 5 e TM/Landsat-4, bem como a do TM/Landsat-5, apresentou, com o tempo, um decaimento na resposta de todas as bandas espectrais.

Nelson (1985b) constatou que, no período de mil dias, começando em 01/01/75, o MSS/Landsat-1 apresentou um decaimento de 25% a 32% nas reflectâncias de todas as quatro bandas. O autor aponta problemas no sistema de calibração interna e no sistema óptico do sensor, como causas prováveis para este decaimento.

Markham e Barker (1987), comparando os valores de vários sensores MSS/Landsat, verificaram que a calibração dos sensores MSS/Landsat-2, 3, 4 e 5 degradou com o tempo, principalmente após os primeiros anos de operação dos sistemas. A Figura 2.3 mostra as reflectâncias da banda MSS4/Landsat-1, 2 e 3 obtidas em duas áreas teste diferentes entre 1975 e 1979.

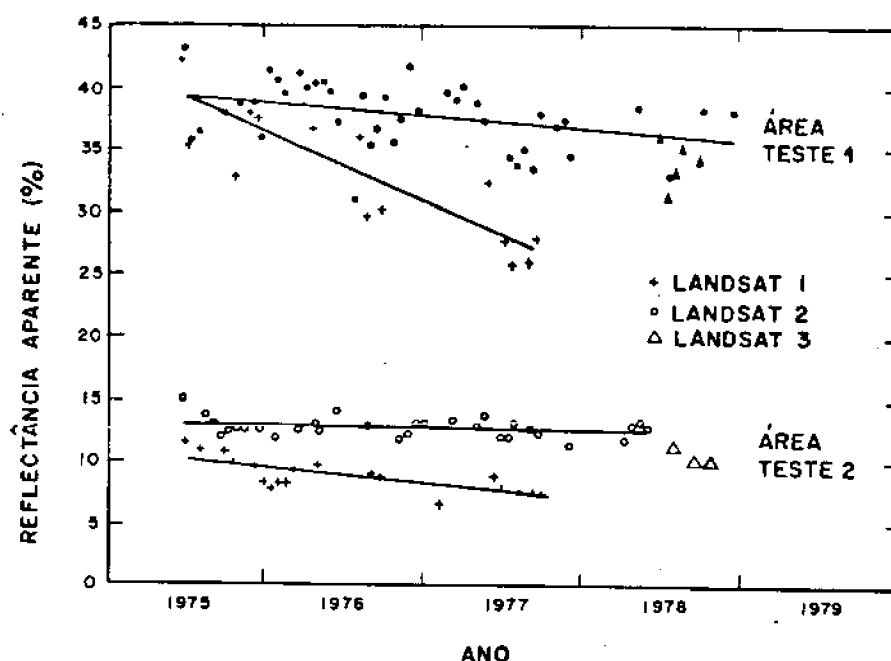


Fig. 2.3 - Estabilidade radiométrica da banda MSS 4/LANDSAT-1, 2 e 3.

FONTE: Markham e Barker (1987).

Segundo Slater et al. (1987), é típico de sensores multiespectrais apresentarem redução da sensibilidade em órbita. Os autores revisaram os resultados obtidos em vários trabalhos sobre a calibração em órbita do CZCS (Coastal Zone Color Scanner) e do TM/Landsat-4 e verificaram que ambos apresentaram uma redução na resposta com o tempo, principalmente nas bandas de menor comprimento de onda. Os resultados obtidos para as bandas TM/Landsat-5, no visível, demonstraram uma redução na sensibilidade em órbita comparada a de pré-lançamento, sendo esta redução dependente do comprimento de onda. O desempenho do sensor em órbita, nos anos subsequentes ao seu lançamento, não foi monitorado. O autor atribui o decaimento na sensibilidade à perda na transmitância do telescópio e na sensibilidade dos filtros, detectores e componentes eletrônicos associados.

2.2.1.2 - CALIBRAÇÃO RELATIVA

O sensor TM possui cem detectores arranjos em sete bandas espectrais. Cada varredura consiste de dezesseis diferentes linhas de imagem para as bandas refletivas e de 4 linhas de menor resolução espacial para a banda termal.

A calibração relativa tem por objetivo compensar as diferenças de resposta entre os detectores, eliminando ou somente minimizando o "striping" gerado por estas diferenças. O "striping" é um tipo de ruído coerente, cujo efeito é o aparecimento de faixas horizontais na imagem, originadas por um desajuste na resposta dos detectores. Nesta fase de calibração geralmente utilizam-se valores estatísticos - média e desvio padrão - procurando ajustar o histograma dos diferentes detectores ao histograma médio da banda.

A primeira calibração relativa é aplicada aos dados TM no pré-processamento em terra.

2.2.1.3 - PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS TM

Os pré-processamentos radiométricos visam transformar os valores digitais brutos em valores digitais calibrados. Tais valores serão uma melhor representação da radiação da cena, tanto absoluta quanto relativa, numa mesma escala de 0 - 255 níveis de cinza.

Esta transformação baseia-se na correção individual de cada um dos 100 detectores com ganhos e "offsets", computados a partir de valores de calibração determinados antes do lançamento, juntamente com os dados fornecidos pelo calibrador interno. O conjunto de ganhos e

"off-sets" para cada detector denomina-se "Look up tables" e define transformações lineares aplicadas rotineiramente na transformação dos dados brutos em dados calibrados, conforme a equação (Barker, 1985):

$$Q_{cal} = LR - NBA / NGA \quad (2.1)$$

onde:

Qcal: radiância corrigida em número digital,
LR: radiância bruta em número digital,
NBA: "off-set" normalizado em ND,
NGA: ganho normalizado adimensional.

Estes dados calibrados são copiados nas fitas e distribuídos aos usuários que podem utilizá-los diretamente, ou ainda aplicar correções adicionais para minimizar algum "striping" residual. Comumente, na prática, tem-se que aplicar correções adicionais para minimizar o striping, porque os valores da "Look up table" não são valores reais; são valores estimados que geram uma curva de transferência aproximada, não exata. A não linearidade na resposta dos detectores seria outra causa para este "striping" residual. Assim, correções radiométricas aos números digitais já calibrados são aplicados, rotineiramente, pelos usuários de fitas CCTs, através de técnicas como a equalização de histogramas. A magnitude do "destriping" aplicado pode ser considerada uma fonte adicional de incerteza na calibração ou na medida da sua precisão.

Os números digitais radiometricamente calibrados para cada pixel de uma banda podem agora ser convertidos para valores de radiância espectral, assumindo-se a adequação dos valores computados na geração da "Look up table".

As fitas CCTs TM/Landsat-5 geradas em Cachoeira Paulista são calibradas com uma "Look up table" computada somente com valores determinados antes do lançamento. Os problemas com o calibrador interno do TM impossibilitaram o uso de seus pulsos na atualização dos parâmetros de calibração. No entanto a qualidade das imagens é aparentemente boa, apresentando pouco "striping" por Serra, 1988. Os produtos gerados não sofrem correção adicional para o "striping" residual, como ocorre, por exemplo, com os produtos gerados no CCRS (Canadian Center of Remote Sensing) (Murphy et al., 1984).

Os sinais gravados nas fitas CCTs estão sujeitos a uma série de outros ruídos radiométricos ligados ao sistema sensor os quais não serão discutidos aqui por serem sutis e, na maioria das vezes, não tão bem documentados e discutidos na bibliografia. Entre eles: ruído coerente, MTF (Schowengerdt et al., 1985), erros de quantização (Bernstein e Lotspiech, 1985).

2.2.2 - EFEITOS ATMOSFÉRICOS

A distribuição da radiância aparente medida no topo da atmosfera difere de sua distribuição intrínseca na superfície terrestre, devido à presença da atmosfera. Na Figura 2.4 pode-se observar a diferença entre a irradiância solar no topo da atmosfera e a irradiância que chega à superfície. A discrepância entre elas é devida às interações da radiação com os constituintes atmosféricos.

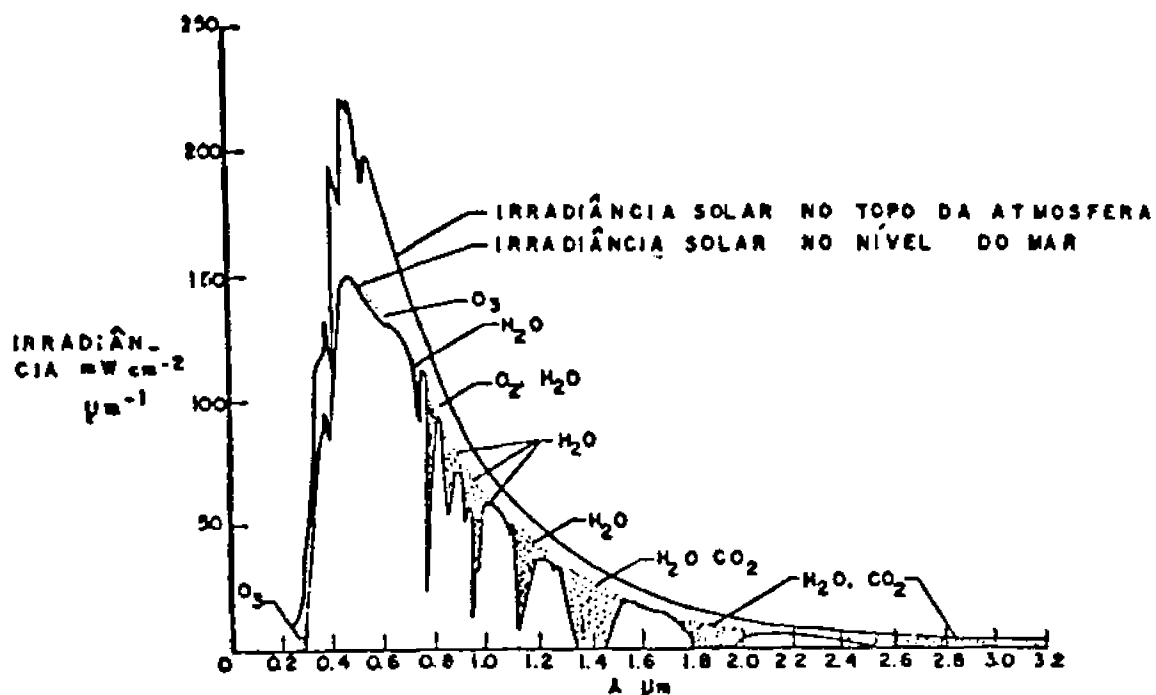


Fig. 2.4 - Irradiância medida no topo da atmosfera e no nível do mar.

FONTE: Adaptada de Bowker et al. (1985).

Ao passar pela atmosfera a radiação eletromagnética é espalhada, absorvida e refletida por gases e particulados. Além dos principais gases atmosféricos, como o nitrogênio e o oxigênio moleculares, também desempenham seu papel na transferência de radiação o dióxido de carbono, vapor d'água, ozônio, monóxido de carbono, metano, hidrogênio e hélio.

As absorções mais fortes ocorrem no ultravioleta como resultado de transições eletrônicas de átomos de oxigênio, nitrogênio e ozônio. Outra região de forte absorção é o infravermelho, onde processos vibracionais e rotacionais de moléculas de H_2O , CO_2 e O_2 são responsáveis pelas bandas de absorção. Na região do visível (0,40 - 0,70 μm) há muito pouca absorção. No entanto, é nesta região que ocorrem espalhamentos múltiplos responsáveis pela redistribuição da radiação.

Além dos componentes gasosos, a radiação também é afetada pelas partículas. Se as partículas tiverem um tempo de permanência na atmosfera relativamente longo, em comparação com o tempo da investigação, pode-se chamar de aerossóis esta dispersão semi-permanente de partículas sólidas e líquidas.

Os principais processos de interação da radiação com a atmosfera que interferem na obtenção de dados com sensores remotos orbitais podem ser observadas na Figura 2.5.

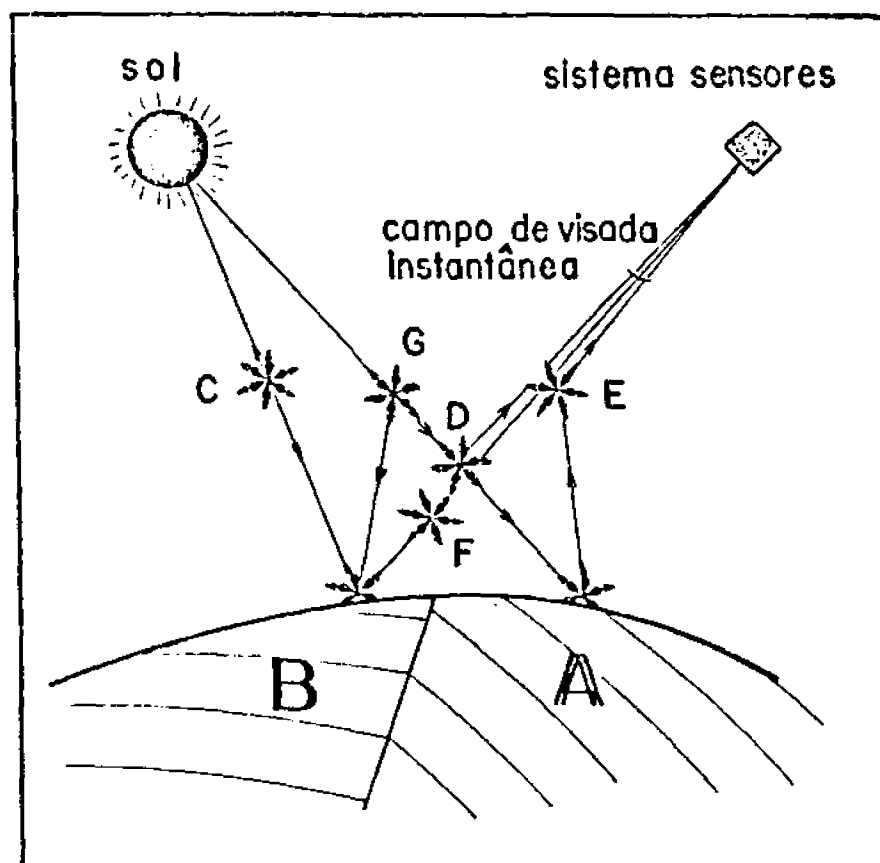


Fig. 2.5 - Principais processos de interação da REM com a atmosfera.

FONTE: Adaptada de Slater (1980), p. 21.

Até atingir o alvo a radiação solar é parcialmente absorvida e espalhada, fazendo com que a irradiância na superfície terrestre seja a soma de um componente direto e outro difuso. Um exemplo deste componente difuso é o fluxo espalhado por G. A superfície reflete parte do fluxo incidente na direção do sensor. O fluxo refletido passa pela atmosfera, sendo novamente absorvido e espalhado, como pode ser observado em F. A atmosfera também espalha um fluxo diretamente na direção do sensor, sem que ele tenha interagido com a superfície. Este tipo de contribuição é denominada "radiância da trajetória" e pode ser exemplificada pelo que ocorre em D. Além da "radiância da trajetória", outro efeito aditivo é a radiação proveniente de alvos fora do campo de visada do sensor, e que foi espalhada na sua direção (E). Tal efeito é comumente denominado "efeitos das adjacências".

A relação entre a radiância que chega ao sensor e a reflectância da superfície é representada de uma maneira simplificada pela equação (Turner e Spencer, 1972).

$$L = R.E.T / \pi + L_p \quad (2.2)$$

onde:

- L: radiância medida pelo sensor,
- R: reflectância difusa efetiva do material,
- E: irradiância no alvo,
- T: transmitância atmosférica do alvo ao sensor,
- L_p: radiância da trajetória.

A transmitância atmosférica é expressa em termos de coeficiente de extinção espectral ou profundidade óptica - $T'_{ext}(0)$ - para uma trajetória com ângulo 0 através da atmosfera. O coeficiente de extinção é uma

quantidade adimensional que indica o quanto o sinal foi atenuado.

Variações na profundidade óptica causam efeitos interrelacionados na irradiância e na radiância que chega ao sensor. Com uma grande profundidade óptica, têm-se uma menor irradiância solar direta na superfície, um maior componente difuso espalhado do fluxo descendente, maior atenuação do fluxo refletido pela superfície e uma maior radiância da trajetória. A radiância da trajetória é de especial importância em estudos quantitativos de imagens obtidas por sensores orbitais, porque, com alvos de baixa reflectância, na faixa dos comprimentos de onda pequenos (Lei de Rayleigh) ou atmosfera turbida, é o componente predominante que chega ao sensor (Slater e Jackson, 1982).

A profundidade óptica é dependente do tipo de gases e aerossóis presentes na atmosfera (composição química, tamanho, índice de refração) e da sua distribuição espacial horizontal e vertical. A grande dificuldade para se corrigirem efetivamente os efeitos atmosféricos com modelos de transferência da radiação está na determinação destes parâmetros, bem como na formulação de modelos de correção que levem em consideração os complexos mecanismos de interação entre a radiação eletromagnética e a atmosfera.

Vários autores têm estudado os efeitos atmosféricos nos dados de sensoriamento remoto, enfatizando a importância da sua correção (Turner e Spencer, 1972; O'Neill et al., 1978; Ahern et al., 1977 e 1979; Richardson, 1981 e Slater e Jackson, 1982).

Um modelo atmosférico é um pré-requisito chave para a correção radiométrica das cenas, na medida em que ele modela os efeitos atmosféricos, permitindo a sua

remoção, e possibilita que os efeitos atmosféricos sejam levados em conta na correção de outros efeitos como os topográficos, de iluminação e de geometria de visada. No entanto, nos últimos 10 anos com exceção de poucos trabalhos, pouco se tem avançado nas correções atmosféricas. Segundo Slater (1985), isto se deve à ênfase que foi dada nos anos 70 à análise estatística dos dados das imagens, sem correções atmosféricas mais complexas, e à pouca precisão obtida em pesquisas anteriores. Esta falta de precisão é atribuída a três fatores principais:

- 1) modelos de transferência da radiação inadequados - muito simplificados para facilitar os cálculos e que não levam em conta os espalhamentos múltiplos e efeitos das adjacências;
- 2) dificuldade de se caracterizar a atmosfera - o pesquisador tem que assumir e estimar muitos parâmetros, o que introduz incerteza nos resultados;
- 3) impossibilidade de se verificar resultados devido à incerteza na calibração absoluta em voo dos sensores envolvidos.

Devido a estas dificuldades, que em parte ainda perduram, resta como opção para a normalização ou atenuação dos efeitos atmosféricos, a utilização de métodos mais simples que utilizem somente informações intrínsecas às imagens. Estes métodos limitam-se a estimar a radiância da trajetória (termo aditivo), negligenciando a transmitância atmosférica (termo multiplicativo).

A aplicação de correções atmosféricas constitui um problema não só no Brasil, mas também em países onde dados sobre atmosfera são coletados com maior

constância. Mesmo quando se dispõe dos dados atmosféricos necessários às correções, têm-se o problema da escolha do modelo mais adequado.

2.2.3 - EFEITOS DA GEOMETRIA SOL - ALVO - SENSOR

A energia eletromagnética interage com os alvos da superfície terrestre microscopicamente - interações em níveis atômicos e moleculares - e macroscopicamente - interações superficiais reguladas pelas leis da óptica geométrica. Macroscopicamente, a geometria de iluminação e visada condiciona a resposta espectral dos alvos, em função das suas propriedades de reflectância bidirecional, influenciando, também, na quantidade de energia que chega ao alvo para interagir microscopicamente com ele.

A irradiância solar que chega à superfície é função da geometria de iluminação, enquanto a radiância que chega ao sensor depende da geometria de iluminação e visada do sensor.

Vários autores têm discutido a dependência entre os valores digitais representativos da radiância dos alvos e a geometria de aquisição das cenas, em sistemas orbitais como o NOAA (AVHRR) (Advanced Very High Resolution Radiometer), Landsat (MSS e TM) e SPOT (HRV) (Kirchner et al., 1981; Schnetzler, 1981; Piwinski et al., 1983 e Duggin, 1985). Um ponto em comum entre os diversos estudos é que a magnitude desta dependência está intimamente associada ao tipo de cobertura do terreno. Esta forte associação entre a magnitude dos efeitos e o tipo de cobertura deve-se ao comportamento não lambertiano da maioria dos alvos naturais, fator que acarreta variações na radiância que chega ao sensor, em função das condições de iluminação e visada.

Para alvos lambertianos, o efeito do ângulo de visada seria somente um diferencial nas condições atmosféricas. Entretanto, as características refletoras reais das superfícies tornam-no complexamente dependente da estrutura e densidade das coberturas, dos ângulos solares zenital e azimutal e das condições atmosféricas (Duggin, 1985). Por um lado, esta dependência pode ser vantajosa na maximização de diferenças entre coberturas com propriedades estruturais distintas; mas por outro lado, introduz variações indesejadas em processos de classificação dos alvos. Os efeitos devidos à variação do ângulo de visada são mais pronunciados naqueles sensores que operam com FOVs maiores, como o NOAA (AVHRR) (56°), o BENDIX (M2S) (50°) e naqueles com visadas "off-nadir", como o SPOT (HRV) (27°). Entretanto, mesmo imagens obtidas pelo TM/Landsat-5 que opera com um FOV relativamente pequeno ($7,5^\circ$), apresentam variações significativa ao longo de uma linha imageada (Teillet et al., 1982 segundo Staenz et al., 1986).

Por sua vez, a geometria de iluminação controla a irradiância que chega ao alvo, em função do ângulo de incidência da radiação com uma superfície horizontal segundo a lei dos cossenos:

$$E = E_0 \cdot \cos \theta \quad (2.3)$$

onde:

E: irradiância na superfície,

E_0 : 1353 watt.m - constante solar,

θ : ângulo solar zenital.

Diferentes ângulos de iluminação também causam variações dos efeitos atmosféricos sobre a radiância

solar direta e difusa, na medida em que alteram a trajetória da radiação até o alvo; além de afetar o sombreamento das superfícies em função do relevo e micro-relevo (efeitos topográficos).

O satélite Landsat-5 opera com uma órbita circular quase polar, imageando a mesma área a cada dezesseis dias. Como a órbita do Landsat é síncrona com o Sol, as relações geométricas entre a órbita descendente, a trajetória no terreno e a projeção média do Sol no plano equatorial, permanecem aproximadamente constantes durante a missão. Como resultado a hora média solar de cada ponto individual na órbita permanecerá fixa, fazendo com que todos os pontos em uma dada latitude tenham a mesma hora solar. Esta condição permite que imagens obtidas na mesma estação do ano, com intervalos de um ano ou mais, tenham condições de iluminação quase iguais.

Entretanto, em análises que envolvam imagens obtidas em diferentes épocas do ano, ou latitudes, tem-se que normalizar ou corrigir as condições de iluminação.

Middleton e Lu (1983), analisando valores digitais MSS adquiridos sobre áreas florestais, distribuídas em diferentes latitudes, e com ângulos de iluminação solar variando entre $38,4^{\circ}$ e $60,7^{\circ}$, detectaram uma variação de 52% a 85% nos dados devido a variações nas condições de iluminação das cenas.

A influência da geometria de iluminação nos dados de sensores remotos também é discutida em Kowalik e Marsh (1982), Kollenkark et al. (1982), Kimes (1983) e Rosa (1987).

A potencialidade de transformações de bandas como razões e diferenças entre a banda do infravermelho

próximo e a do vermelho (IVP/Verm, IVP-Verm), para minimizar os efeitos devido à geometria de aquisição das cenas, tem sido demonstrada em diversos trabalhos (Schnetzler, 1981 e Staenz et al., 1986). Outra alternativa comumente utilizada é a normalização dos valores para condições padrões de iluminação (45°). No entanto, estes procedimentos simplesmente minimizam a variação dos dados, estando longe de corrigi-los efetivamente. Também alteram a magnitude física dos números digitais, descalibrando-os radiometricamente, impossibilitando a recuperação dos valores de radiância e reflectância da cena (Duggin, 1985).

A correção dos efeitos relacionados à geometria de aquisição das cenas depende do nível de conhecimento sobre o efeito dos diferentes parâmetros geométricos (ângulo de visada, estação do ano, latitude) e as radiâncias registradas. Estas correções são imprescindíveis em trabalhos de monitoramento sobre áreas geograficamente extensas onde se queira avaliar, quantitativamente, as variações temporais detectadas nos valores individuais ou na distribuição espectral da radiância registrada.

2.2.4 - EFEITOS DA TOPOGRAFIA

Produtos de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizados no monitoramento de recursos naturais, recursos estes muitas vezes localizados em regiões montanhosas de difícil acesso aos métodos diretos de reconhecimento. Apesar da importância do sensoriamento remoto no estudo dessas regiões, os efeitos topográficos têm limitado a utilização mais eficiente da técnica em regiões de relevo acidentado.

Em alguns tipos de aplicações, como em estudos geológicos ou na confecção de mapas topográficos

com modelos digitais do terreno, os efeitos topográficos são vantajosos. No entanto, em processos de classificação quase sempre constituem uma fonte indesejada de variação.

Os efeitos topográficos alteram a resposta espectral dos alvos, na medida em que alteram as condições atmosféricas e introduzem variações locais na geometria de iluminação e visada, acarretando efeitos semelhantes aos de visada "off-nadir", variações na irradiância que chega à superfície e sombreamento.

Muitos autores têm discutido os efeitos da variação das inclinações e aspectos morfológicos das superfícies na acurácia das informações extraídas de imagens digitais (Holben e Justice, 1980; Smith et al., 1980; Justice et al., 1981; Teillet et al., 1982 e Cavayas, 1987). Principalmente em áreas cobertas por florestas, são encontradas correlações estatísticas significantes entre os números digitais das imagens e os parâmetros topográficos (Teillet et al., 1982). Por exemplo, Cavayas (1987) detectou, nas duas bandas infravermelhas do MSS, uma diferença absoluta que pode chegar a 20% ou 50% entre números digitais obtidos em terrenos horizontais e inclinados, ambos com a mesma cobertura florestal e ângulos médios de elevação solar. Tais efeitos podem resultar que regiões com o mesmo tipo de cobertura apresentem diferentes respostas espectrais ou vice-versa.

Apesar da dependência entre os números digitais e a topografia já ter sido determinada estatisticamente, a complexidade dos fatores envolvidos (propriedades de reflectância bidirecional da superfície, geometria de visada e de iluminação, e efeitos atmosféricos), tem dificultado a formulação de modelos de correção de aplicação geral. Técnicas como a razão entre bandas podem reduzir a variação dos dados, sob certas

condições (Holben e Justice, 1981); no entanto, estão longe de serem técnicas efetivas de correção.

2.3 - TRANSFORMAÇÕES RADIOMÉTRICAS

De modo a otimizar a extração de informações das imagens, tem-se que levar em consideração os fatores anteriormente discutidos que condicionam a resposta espectral dos alvos. As transformações radiométricas visam diminuir a variabilidade dos dados, corrigindo ou normalizando as condições de aquisição das cenas e, desta forma, fazendo com que as variações na cena correspondam a variações nas propriedades de reflectância dos alvos.

Existem vários tipos de transformações radiométricas que podem ser classificadas em duas categorias principais: as que normalizam os dados descalibrando-os radiometricamente - razões entre bandas, divisões por valores padronizados - e aquelas que normalizam ou corrigem as variações indesejadas nas imagens recuperando a grandeza física absoluta dos números digitais. Este último tipo de transformação é considerada uma correção radiométrica e a sua formulação depende do entendimento e modelagem das diferentes fontes de variação das imagens.

Infelizmente, as correções radiométricas são de difícil formulação e aplicação, principalmente devido à necessidade dos três pré-requisitos apresentados na Figura 2.6.

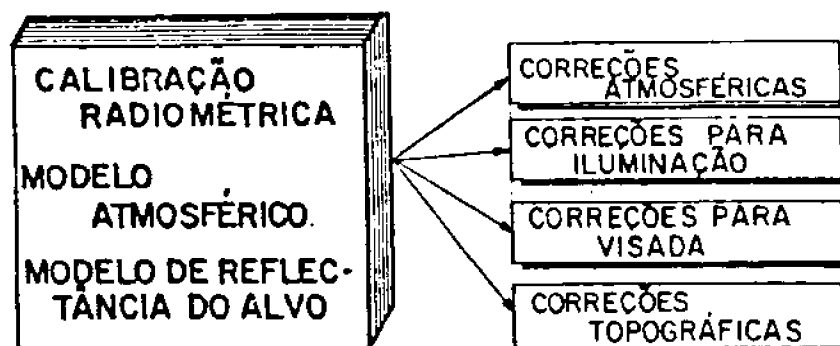


Fig. 2.6 - Pré-requisitos às correções radiométricas.

FONTE: Adaptada de Teillet (1986).

Cada um dos principais tipos de correção necessita dos mesmos três pré-requisitos: a calibração radiométrica absoluta do sistema sensor que possibilite a avaliação, em termos absolutos, do algoritmo de correção; um modelo atmosférico que simule a transferência da radiação do alvo até o sensor; e um modelo de reflectância dos alvos que preveja a sua resposta sob diferentes condições de iluminação e visada.

Na maioria das vezes o modelo atmosférico adotado é simplificado, ou mesmo ignora-se a presença da atmosfera, e o modelo de reflectância dos alvos é uma aproximação do lambertiano. No entanto, implícita ou explicitamente, os pré-requisitos da Figura 2.6 integram as correções radiométricas.

Mesmo sem constituírem, propriamente, algoritmos de correção, as transformações dos números digitais para valores de radiâncias e reflectâncias aparentes têm contribuído significativamente para melhorar a qualidade dos dados em várias aplicações.

A equação que transforma os números digitais em radiâncias é a seguinte (Markham e Barker, 1986):

$$L = (Q_{cal}/Q_{calm\acute{a}x}) \cdot (L_{m\acute{a}x} - L_{min}) + L_{min} \quad (2.4)$$

onde:

L: radiância espectral,

Q_{cal} : radiância calibrada e quantizada em números digitais,

L_{min} : radiância esperada quando $Q_{cal}=0$,

$L_{m\acute{a}x}$: radiância esperada quando $Q_{cal}=Q_{calm\acute{a}x}$,

$Q_{calm\acute{a}x}$: máxima radiância quantizada em ND.

Os valores de radiância obtidos pela Equação 2.4 são convertidos em reflectância pela seguinte equação (Markham e Barker, 1986):

$$R = \pi \cdot L \cdot d^2 / E_{sol} \cdot \cos \theta \quad (2.5)$$

onde:

R: reflectância aparente no topo da atmosfera,

L: radiância espectral no IFOV do sensor em $mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$,

d : distância Sol-Terra em unidades astronômicas,

E_{sun} : irradiância exoatmosférica média em $\text{mW.cm}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$,

θ : ângulo solar zenital em graus.

A transformação dos números digitais para valores de radiância compensa as diferenças entre os ganhos e "off-sets" (intervalo de sensibilidade) de cada banda espectral, enquanto a conversão destes valores de radiância em valores de reflectância compensa as diferenças quanto à irradiância solar no topo da atmosfera e o ângulo de incidência da radiação sobre o alvo, no momento da aquisição da imagem. A distância Sol-Terra varia diariamente, estando o Sol mais próximo da Terra em janeiro de cada ano e mais afastada em julho. Segundo Nelson (1985a), esta variação pode alterar a irradiância solar que chega na superfície em 6,7%.

Robinson (1982) sugeriu a conversão dos números digitais para valores de radiância e reflectância em aplicações que envolvam a análise de imagens obtidas por diferentes sensores (ou um mesmo sensor recalibrado), épocas do ano e localizações. Destaca ainda que além destes valores estarem numa escala absoluta, também são de mais fácil compreensão. Por exemplo, faz mais sentido associar a um alvo uma reflectância de 47% na banda TM5, ao invés de um número digital 64. Salientou que se pode chegar a resultados incorretos utilizando os números digitais de imagens em divisões de bandas, porque a calibração de cada banda é diferente.

Nelson (1985a) investigou o tipo de transformação mais eficiente para reduzir a variabilidade da resposta espectral de seis alvos estáveis no tempo

(rochas, areias e água), obtidas em imagens MSS/Landsat-1, 2 e 3 entre 1975 e 1978. As transformações testadas foram as seguintes:

- transformação para radiância aparente (Equação 2.4);
- transformação para reflectância aparente (Equação 2.5) sem considerar a distância Sol-Terra;
- transformação para reflectância aparente (Equação 2.5);
- transformação proposta pelo ERIM (Environmental Research Institute of Michigan);

$$\text{ERIM} = \cos(39^\circ) / \cos(\theta) \cdot (m \cdot \text{DN} + b)$$

onde:

θ : ângulo solar zenital,

m e b : coeficientes lineares do sensor (ganho e "off-set").

- Razão entre Bandas.

A transformação proposta pelo ERIM utiliza o valor 39° , para a normalização, porque ele está próximo do valor médio dos ângulos zenitais solares presentes na aquisição das imagens.

Concluiu que a transformação para valores de reflectância aparente foi a melhor para diminuir a variabilidade entre as cenas, provendo uma base normalizada

para a comparação de dados obtidos em diferentes datas, por diferentes sensores.

Middleton e Lu (1982) testaram a conversão dos números digitais para radiâncias em processos de classificação com dados de diferentes sensores (MSS/Landsat-1, 2 e 3), áreas e datas (abril a setembro de 1973 - 1978), Detectaram uma redução significativa na variância das classes, devido ao tipo de sensor, principalmente, para a cobertura vegetal nas bandas MSS4 (de 14,7 para 3,7) e MSS7 (de 4.7 para 2.3).

Middleton e Lu (1983) analisaram imagens obtidas pelos MSS/Landsat-1, 2 e 3, com quatro a cinco diferentes calibrações, em diferentes áreas geográficas e com ângulos de elevação solar variando entre 38,5° e 60,7°. Verificaram que a dependência entre os números digitais e as condições de iluminação diminuíram, ou foram eliminadas, com a conversão para valores de "radiâncias normalizadas" (L/seni). A variância das classes diminuiu e a diferença entre as médias tornou-se mais significativa com a conversão.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Conforme o exposto, em análises multitemporais, para um mesmo tipo de alvo, as variações detectadas nas imagens podem ser provocadas pelos seguintes fatores:

- variações relacionadas com o sistema sensor;
- variações nas condições atmosféricas;
- variações na geometria Sol-alvo-sensor;
- variações na topografia;
- variações temporais nas propriedades de reflectância dos alvos estudados.

Na maioria dos trabalhos com dados de sensores remotos de observação da superfície terrestre, objetiva-se avaliar as variações nas propriedades de reflectância dos alvos que estejam relacionadas a mudanças nas suas propriedades físicas e químicas. Para isto, procura-se eliminar ou controlar os fatores de variação indesejados, para que eles não mascarem os efeitos que a pesquisa objetiva estudar.

Neste trabalho, de maneira análoga, os procedimentos de análise e aquisição dos dados foram conduzidos de modo a minimizar os efeitos indesejados de variação. Ou seja, para cada um dos objetivos propostos no Capítulo 1 selecionou-se um conjunto de dados onde varia o

efeito que se deseja monitorar, permanecendo os demais constantes ou controlados.

O Objetivo 1 busca avaliar o efeito da transformação dos números digitais para reflectâncias como minimizadora das variações provocadas por diferentes condições de iluminação. Assim, selecionaram-se imagens onde variam as condições de iluminação e as demais fontes de variação permanecem constantes ou controláveis.

Já o Objetivo 2 visa verificar a estabilidade radiométrica do sensor TM. Para monitorar as variações devidas a desajustes do sistema sensor, utilizaram-se imagens que cobrem um período expressivo de operação do sistema com condições de iluminação, propriedades superficiais dos alvos e condições atmosféricas semelhantes.

E finalmente, visando cumprir o Objetivo 3, escolheram-se alvos de fácil localização nas imagens e com comportamento espectral documentado em trabalhos anteriores para viabilizar a comparação dos valores de números digitais e reflectâncias das imagens, entre eles, e com os espectros de campo e laboratório já disponíveis.

Assim, selecionaram-se alvos homogêneos, de comportamento espectral razoavelmente conhecido e estável no tempo, para a extração de números digitais em cinco passagens diferentes, sobre a mesma área. Quatro destas passagens são do mês de maio dos anos de 1984, 1985, 1986 e 1987, apresentando condições de iluminação semelhantes. A quinta passagem corresponde ao mês de outubro de 1984, a qual apresenta, conseqüentemente, condição de iluminação diferente. Os números digitais foram transformados para radiâncias e reflectâncias aparentes, tomando-se os parâmetros de calibração específicos do TM/Landsat-5, para

cada banda espectral. Como não se dispõe de dados de radiossondagem para os dias das passagens analisadas, a atenuação dos efeitos atmosféricos foi feita com um método que necessitava somente informações intrínsecas às imagens. Utilizaram também observações meteorológicas de superfície para avaliar as similaridades das condições atmosféricas nas diferentes datas.

No próximo item, são descritos a área de estudo, os alvos selecionados, as imagens utilizadas e os procedimentos de aquisição, transformação radiométrica e análise dos dados.

3.2 - ÁREA DE ESTUDO

Selecionou-se como área de estudo um setor da borda leste da Serra do Ramalho (BA), situada à margem oeste do rio São Francisco, e um trecho do Rio Corrente distante aproximadamente 10 km a noroeste da Serra do Ramalho (Figura 3.1).

Esta região encontra-se na zona de transição entre dois grandes domínios geomorfo-paisagísticos - os chapadões tropicais recobertos por cerrado e as depressões intermontanas do semi-árido.

A Serra do Ramalho, como um todo, ocupa uma área de aproximadamente 4.000 km² dos quais foi delimitado um quadrilátero de 15 km x 15 km, no trecho onde a serra expõe rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. Este quadrilátero também engloba a porção leste do chapadão arenítico do Urucuia, completamente recoberto por cerrado.

Esta região pertence, em parte, ao município de Bom Jesus da Lapa, sudoeste do Estado da Bahia, distante 50 Km a leste da área de estudo. É delimitada pelas coordenadas $13^{\circ}29'$ - $13^{\circ}39'$ de latitude e $43^{\circ}42'$ - $43^{\circ}48'$ de longitude (Figura 3.1).

Todas as informações gerais sobre a área, bem como as mais detalhadas - localização, características superficiais, comportamento espectral, composição, etc. - referentes aos alvos selecionados, as quais são descritas nesta seção, foram extraídas de Meneses (1986). O autor utilizou a mesma área no seu estudo, apresentando uma caracterização detalhada do quadro natural e litologias da região.

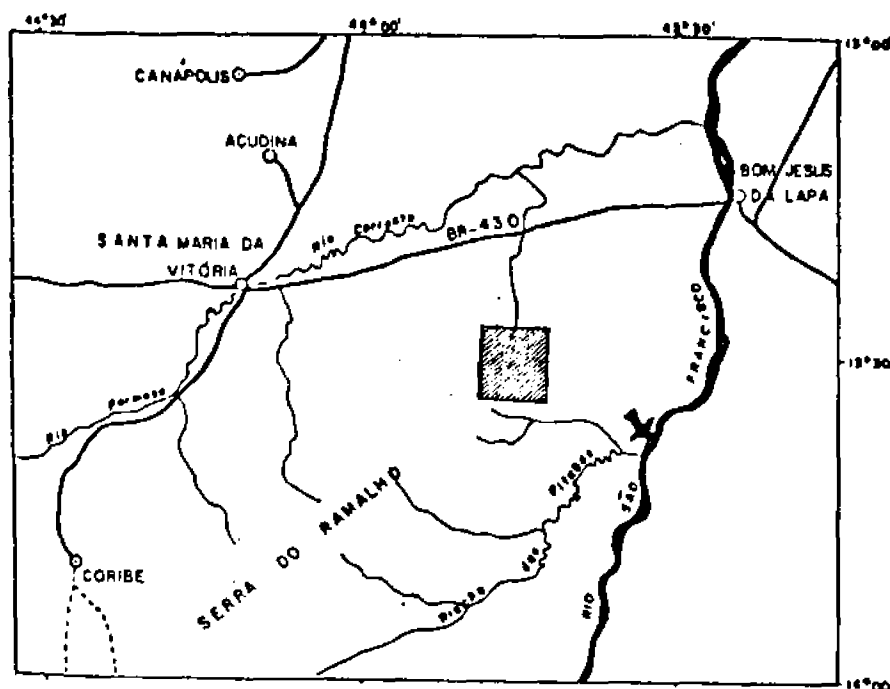


Fig. 3.1 - Mapa de localização da área de estudo.

FONTE: Meneses (1986).

Os fatores que foram relevantes na seleção desta área para o desenvolvimento do estudo proposto são os seguintes:

- conhecimento prévio da área de estudo como um todo e de seus alvos em particular;
- algum conhecimento de medições radiométricas referente ao comportamento espectral das rochas carbonáticas, no intervalo de 0,35 μm a 1,55 μm ;
- ocorrência de unidades constituídas essencialmente por rochas aflorantes que formam extensos patamares completamente despidos de vegetação, ou seja, alvos que apresentam pouca variação no seu estado superficial com o tempo;
- presença de outros alvos extensos, homogêneos e de comportamento espectral distinto (cerrado denso e corpos d'água);
- localização de uma estação meteorológica no município de Bom Jesus da Lapa a qual, apesar de não dispor de medidas de radiossondagem coincidentes com as datas das imagens selecionadas para a investigação, dispõe de observações meteorológicas de superfície. Estes dados de superfície podem auxiliar na avaliação da similaridade das condições atmosféricas nos dias correspondentes às passagens analisadas, e;
- a disponibilidade de imagens de boa qualidade radiométrica, obtidas em épocas favoráveis às análises pretendidas.

3.3 - ALVOS SELECIONADOS

Tendo em vista os objetivos propostos, a seleção dos alvos que foram utilizados como referência obedeceu aos seguintes critérios:

- conhecimento prévio da localização geográfica, extensão e homogeneidade dos alvos, a fim de facilitar a definição das áreas de amostragem dos números digitais;
- alvos que apresentassem um comportamento espectral razoavelmente conhecido e documentado em trabalhos anteriores;
- estabilidade deste comportamento espectral com o tempo, devido à estabilidade das características superficiais e composicionais dos alvos;
- caráter de baixa rugosidade das superfícies para evitar variações devidas aos efeitos topográficos, e;
- alvos com diferentes propriedades de reflectância, permitindo a análise dos dados em diferentes níveis de intensidade.

Assim, conforme os critérios expostos acima, selecionaram-se cinco alvos de referência: três tipos de litologias (3 alvos), uma área de cobertura vegetal (1 alvo) e um trecho do Rio Corrente (1 alvo). Descrevem-se a seguir as propriedades superficiais, comportamento espectral e composição dos alvos selecionados.

3.3.1 - LITOLOGIAS

As litologias selecionadas como alvos de referência são rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, pertencentes a uma mesma unidade estratigráfica. Esta unidade identifica-se por pavimentos sem vegetação que dominam a paisagem morfológica na borda leste da Serra do Ramalho, exibindo uma das mais representativas morfologias cársticas do Grupo Bambuí.

O destaque morfológico da serra é dado por longos escarpamentos calcários semelhantes a muralhas e pelas formas de dissolução dos pavimentos rochosos, com predomínio das feições de lâpies. Estas feições são exemplo de evolução cárstica em meio quente e seco, própria de calcários muito puros e clima tropical seco.

Os constituintes minerais principais das rochas carbonáticas, como calcita e dolomita, não produzem qualquer feição de absorção marcante no intervalo espectral de operação do TM, a não ser na banda TM7. A discriminação espectral das litologias ocorre em função de alguns constituintes secundários - conteúdo de matéria orgânica nos calcários, substituição do ferro e/ou oxidação das superfícies dos minerais nos dolomitos.

Estas feições espectrais derivam de processos eletrônicos devidos principalmente à transferência de carga, envolvendo quase que exclusivamente íons de ferro no estado férrico e ferroso.

a) Alvo 1

Apresenta superfícies com feições microcársticas, fraturadas e desprovidas de solo ou qualquer tipo de vegetação. Composicionalmente e

mineralogicamente são calcários puros, muito similares entre si, normalmente com cor cinza escuro.

A Figura 3.2 mostra o comportamento espectral desta litologia.

Estes alvos apresentam uma baixa reflectância no visível, em torno de 0,6% em 0,4 μm , com um suave aumento em direção ao infravermelho (0,7 μm), atingindo 12% de reflectância. O baixo nível de reflectância e o suave gradiente da curva no visível é consequência da composição muito pura destes calcários, quase totalmente formados por calcita, sem a presença de óxidos ou argilominerais. Em 0,7 μm , os espectros sofrem um sensível aumento no gradiente de reflectância que tende a se manter nos comprimentos de onda maiores. Algumas bandas de absorção aparecem, apesar de serem amplas.

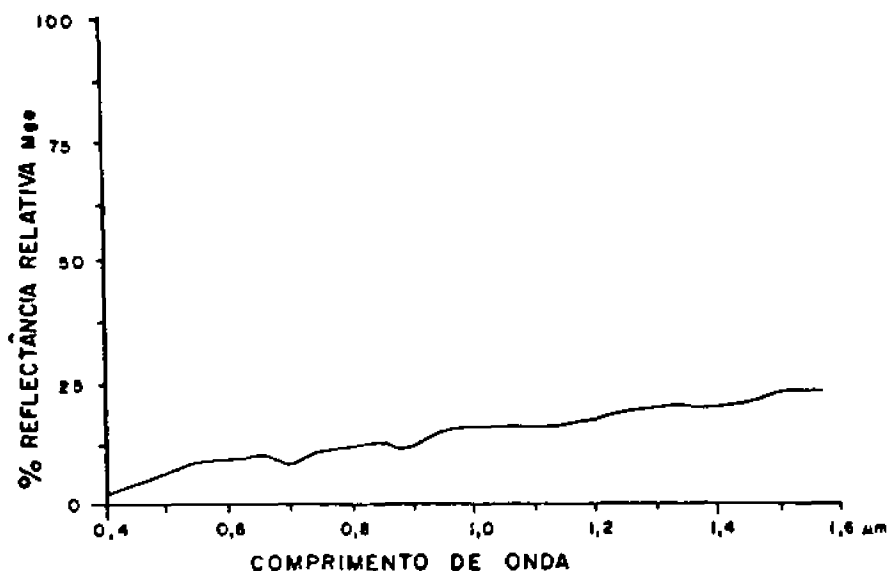


Fig. 3.2 - Comportamento espectral do Alvo 1.

FONTE: Meneses (1986).

Estes calcários têm seus afloramentos mais expressivos localizados na parte leste do Morro dos Porcos, na Serra Solta e no Morro de Santo Antônio, como pode ser observado na Figura 3.3.

b) Alvo 2

São calcilutitos e calcarenitos finos, cinza escuros, que se diferenciam morfológicamente dos carbonatos do Alvo 1 por constituírem imensos lâpies pontiagudos.

Têm composição química e comportamento espectral semelhante ao Alvo 1 (Figura 3.4). A sua tonalidade mais escura nas imagens (Figura 3.3), em relação ao Alvo 1, decorre de variações na intensidade das formas dos lâpies pontiagudos.

As regiões amostradas localizam-se em ocorrências na porção oeste do Morro dos Porcos (Figura 3.3) e mais ao sul, na parte oeste da Serra do Campo Alegre. No Morro Santo Antônio formam uma auréola na porção nordeste.

c) Alvo 3

Ocorre lado a lado com o Alvo 1, formando pavimentos rochosos com superfícies quase idênticas, mas que se distinguem pela composição dolomítica. Os dolomitos distinguem-se dos calcários do Alvo 1 por apresentarem cores normalmente cinza claras e superfícies de dissolução menos intensas, não possuindo formas de microlâpies em pontas.

A constituição química destes dolomitos, nos seus constituintes secundários, difere pouco dos calcários do Alvo 1.

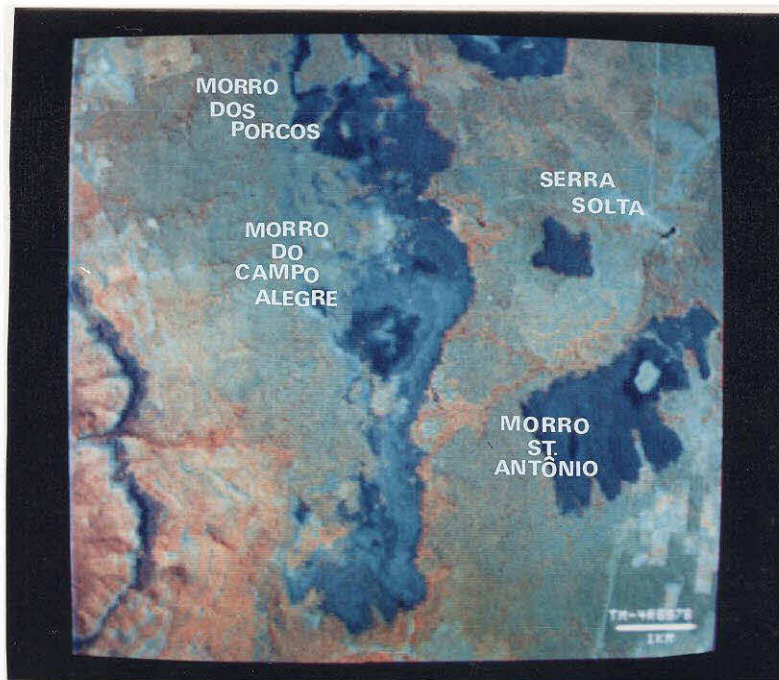


Fig. 3.3 - Imagem realçada de uma das áreas de estudo.

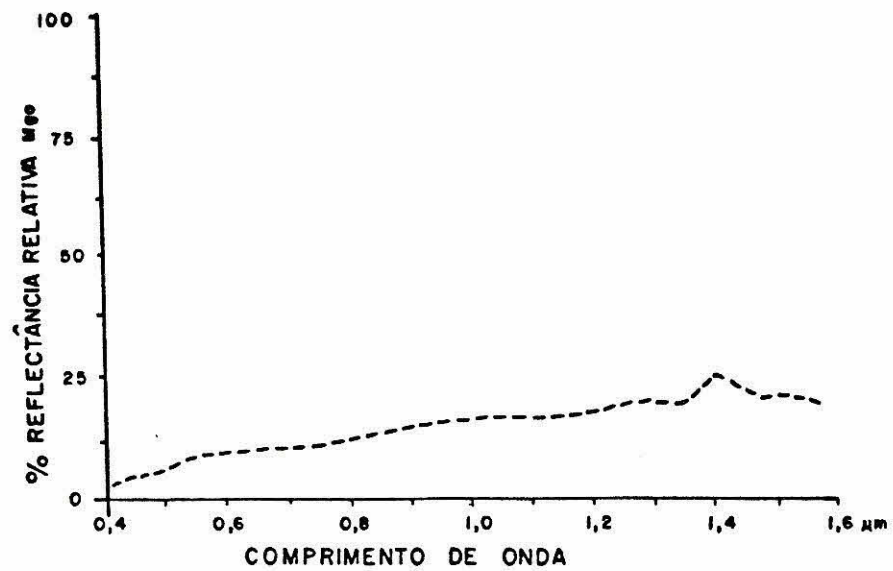


Fig. 3.4 - Comportamento espectral do Alvo 2.
FONTE: Meneses (1986).

Sabe-se que os espectros dos minerais de calcita e dolomita são praticamente idênticos. Entretanto, como se observa na Figura 3.5, o trabalho de Watson (1972) mostra calcários de maior reflectância ao longo do espectro, diferenciando-se dos dolomitos somente devido ao albedo de sua superfície. No entanto, de acordo com Meneses (1986) os dolomitos e calcários dos Alvos 3 e 1, respectivamente, apresentam uma relação de reflectância inversa. A justificativa para isto é a presença mais intensa de material opaco carbonáceo, nas rochas calcárias, que baixa a reflectância total a níveis de porcentagens bem menores. Na Figura 3.6 pode-se observar o comportamento espectral deste alvo.

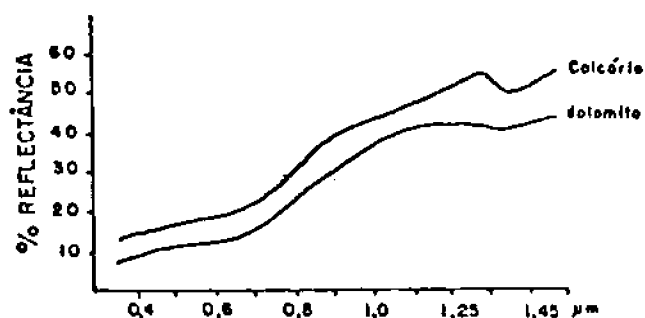


Fig. 3.5 - Comportamento espectral dos calcários e dolomitos.

FONTE: Watson (1972), p. 37.

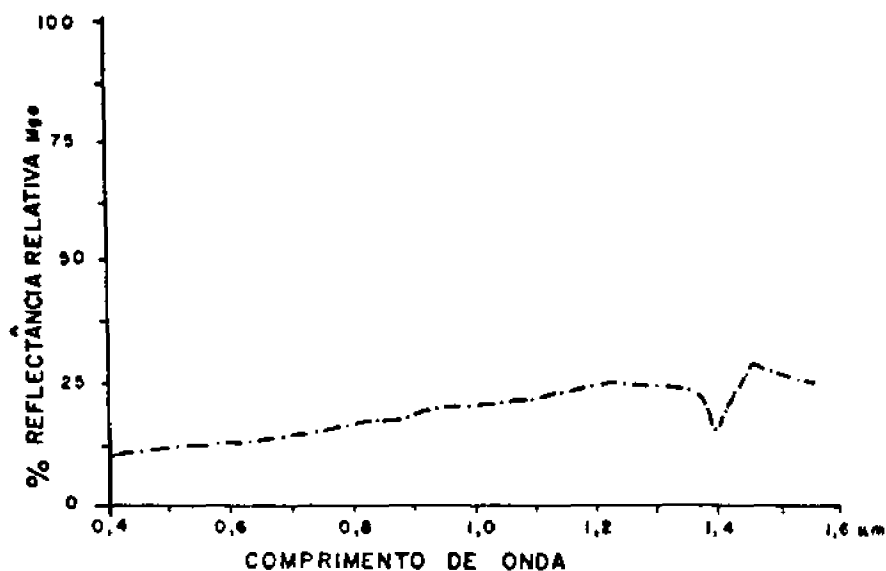


Fig. 3.6 - Comportamento espectral do Alvo 3.

FONTE: Meneses (1986).

Os dolomitos do Alvo 3 ocorrem na área da Serra do Campo Alegre onde é possível demarcar os seus limites em relação aos calcários do Alvo 1 (Figura 3.3). Nesta região, pode-se também identificar com boa precisão os locais onde os dolomitos afloram com maior possança.

3.3.2 - VEGETAÇÃO (ALVO 4)

Apesar da vegetação ser um tipo de cobertura que apresenta maior probabilidade de variação nas condições superficiais, ela também foi selecionada como alvo de estudo. Com este tipo de alvo seria possível fazer uma comparação das variações detectadas em alvos mais estáveis com as detectadas em alvos mais instáveis radiometricamente.

A área amostrada apresenta um cerrado de arranjo homogêneo que capeia o chapadão arenítico do Urucuia. A área tem uma cobertura vegetal uniforme, constituída de espécies arbóreas que revestem quase que por completo o terreno. O cerrado caracteriza-se por indivíduos de porte atrofiado, esgalhamento baixo e copas assimétricas, súber espesso e folhas muitas vezes coriáceas e ásperas (Meneses, 1986).

O comportamento espectral da vegetação caracteriza-se por três tipos de interações controladas por diferentes fatores. No visível, as interações são dominadas pelos pigmentos foliares; no infravermelho próximo, pela estrutura celular e no infravermelho médio, pelo conteúdo de água. Segundo Raines e Canney (1980), de 0,4 μm a 0,7 μm há uma grande absorção da vegetação para suprir a energia necessária à fotossíntese, com um forte pico em 0,45 μm e 0,68 μm devido aos pigmentos da clorofila (Figura 3.7). Na região de 0,7 μm a 1,3 μm ocorre o inverso. A vegetação torna-se altamente refletiva devido às descontinuidades do índice refrativo interno das interfaces ar-água no interior das folhas. De 1,3 μm a 2,5 μm novamente ocorrem absorções devido à presença, de água nas células das folhas a qual condiciona o comportamento da reflectância.

A Figura 3.8 mostra o espectro de folhagens de cerrado determinado em campo por Vitorello (1988) com o radiômetro HHRR (Hand Held Reflectance Radiometer).

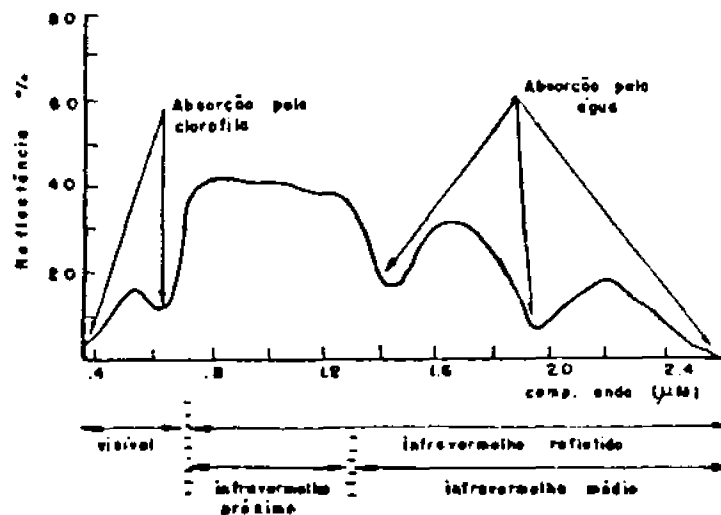


Fig. 3.7 - Comportamento espectral de folhas de espécie da vegetação.

FONTE: Adaptada de Hoffer (1978), p. 332.

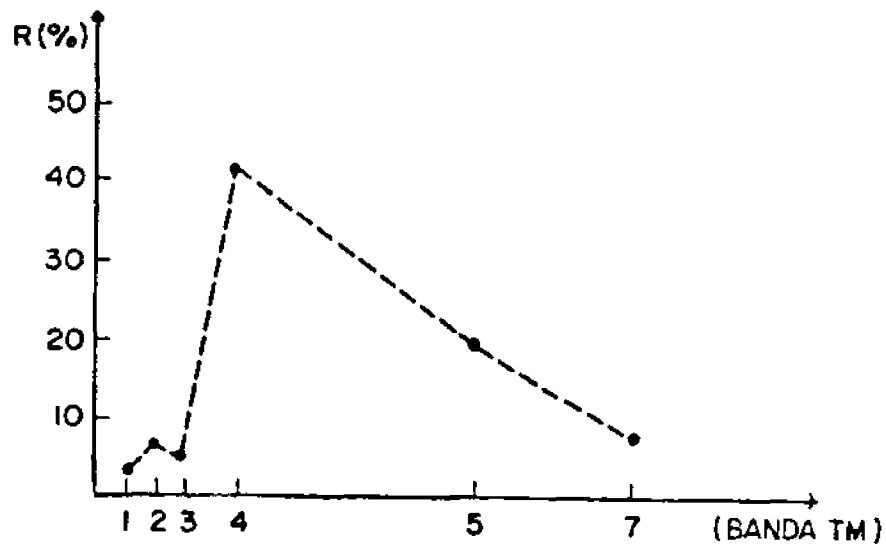


Fig. 3.8 - Comportamento espectral de folhas de espécie do cerrado.

FONTE: Vitorello, 1989.

3.3.3 - ÁGUA (ALVO 5)

O Alvo 5 é um trecho do Rio Corrente distante, aproximadamente, 10 km a noroeste da Serra do Ramalho, onde foram amostrados os alvos anteriores.

Embora este alvo não possa ser considerado um alvo estável no tempo; ele foi selecionado, devido à sua homogeneidade e comportamento espectral razoavelmente documentado na literatura. Bowker et al. (1985) e Hoffer (1978) apresentam curvas espectrais para águas fluviais turbindas e límpidas, determinadas por levantamentos espectrorradiométricos em vários rios.

A água é facilmente distinguida dos outros alvos terrestres pela sua baixa reflectância, principalmente no infravermelho próximo. Nesta parte do espectro, a água absorve a energia incidente restando pouca energia para ser refletida (Figura 3.9).

No visível, a interação da REM com a água é mais complexa. A energia é refletida pela superfície e pelos materiais do fundo ou em suspensão. A turbidez causada pelos sedimentos em suspensão é o principal fator atuante na resposta espectral dos corpos d'água, causando um aumento na reflectância e um deslocamento do pico de reflectância para comprimentos de onda maiores. A concentração de clorofila também afeta a resposta espectral da água: o aumento da concentração de clorofila diminui a energia refletida no azul e aumenta a do verde.

Consciente da dificuldade de se determinar o tipo exato de água amostrado, ela será considerada como água fluvial turbida.

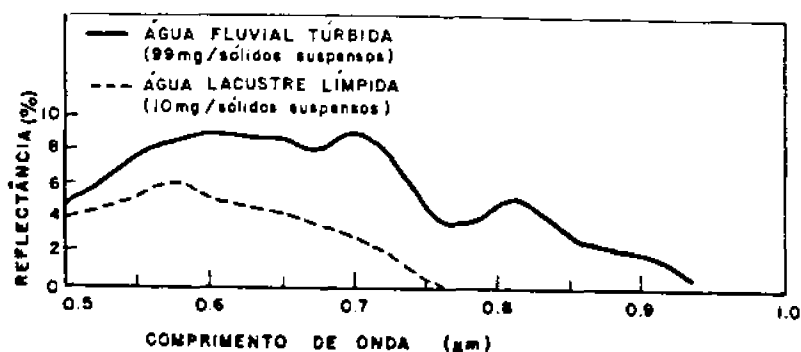


Fig. 3.9 - Comportamento espectral de águas fluviais túrbidas e de águas lacustres límpidas.

FONTE: Hoffer (1978), p. 257.

3.4 - DADOS DIGITAIS TM

Os valores digitais utilizados neste estudo foram extraídos de fitas CCTs, no sistema analisador de imagens GE-Image-100 ou I-100, pertencente ao Instituto de Pesquisas Espaciais.

As passagens selecionadas são de 28/05/84, 15/05/85, 18/05/86, 21/05/87 e 19/10/84 identificadas pela Órbita 268 ponto 69. Todas as cenas apresentam boa qualidade radiométrica (sem "stripping") e praticamente 0% de cobertura de nuvens. Procurou-se selecionar dois conjuntos de imagens a serem analisados separadamente, conforme os objetivos propostos. Escolheram-se dois conjuntos de imagens: um conjunto de duas imagens com condições de iluminação diferentes (passagens de 28/05/84 e 19/10/84); e um outro conjunto de quatro imagens, obtidas na mesma época do ano e com ângulos de iluminação os mais próximos possível, para minimizar possíveis variações nos dados que estejam relacionadas com pequenas variações na geometria de iluminação, ou variações sazonais na superfície. Na Tabela 3.1 estão listadas as datas das passagens utilizadas e os seus respectivos ângulos de elevação solar.

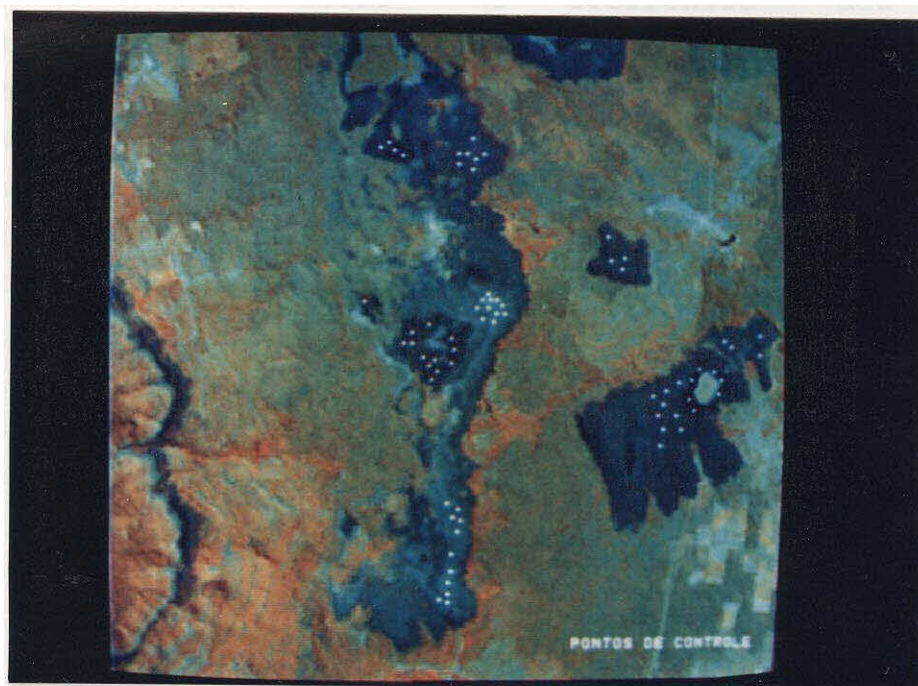
TABELA 3.1

DATAS DAS PASSAGENS ANALIZADAS E ÂNGULOS DE ELEVAÇÃO SOLAR

DATA	EL. SOLAR
28/05/84	40
15/05/85	42
18/05/86	39
21/05/87	40
19/10/84	57

Inicialmente foram feitas composições coloridas na escala de 1:25.000, para facilitar a localização dos alvos previamente selecionados. Após a identificação visual dos alvos, marcaram-se os pontos de amostragem dos números digitais os quais podem ser visualizados na Figura 3.10a (Alvos 1, 2 e 3) e na Figura 3.10b (Alvo 4).

a)



b)

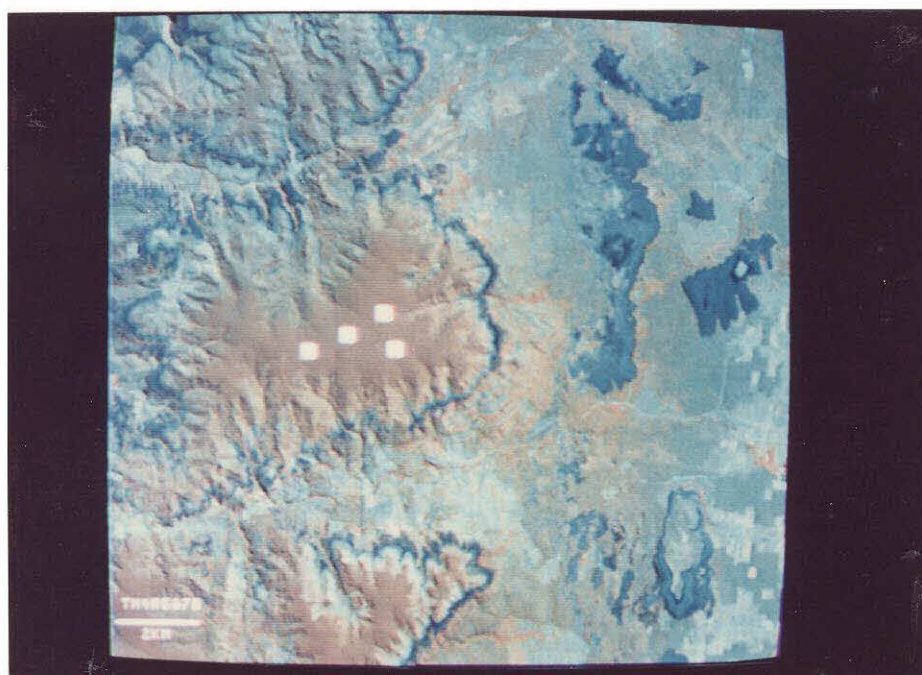


Fig. 3.10 - Pontos de amostragem para os Alvos 1, 2 e 3 (a) e para o Alvo 4 (b).

As áreas de ocorrência dos alvos selecionados foram localizadas com o auxílio das informações de campo, fotografias de imagens realçadas de Meneses (1986) e mapa geológico 1:50.000 da CBPM (Companhia Bahiana de Pesquisa Mineral). O número de pontos amostrados, bem como a sua distribuição espacial, foi condicionada pela necessidade de se amostrar somente os locais que, com certeza, correspondiam ao tipo de alvo previamente selecionado. No caso das litologias (Alvos 1, 2 e 3), procurou-se amostrar próximo às medidas espectrorradiométricas obtidas por Meneses (1986), para facilitar a comparação com os espectros obtidos nas imagens.

Foi possível amostrar 23 pixels para o Alvo 1, 24 para o Alvo 2, 21 para o Alvo 3, 40 para o Alvo 4 e 25 para o Alvo 5.

Após a localização dos pontos de amostragem, os módulos na escala de 1:25.000 foram reduzidos para a escala de 1:50.000, na qual devido às dimensões do vídeo (30 cm x 30 cm) e à resolução espacial no terreno (30 m x 30 m), um ponto na tela equivale à informação espectral de um pixel no terreno. Listagens "print-outs" com os números digitais de toda a região de interesse serviram para se ter uma idéia dos números digitais dos pixels adjacentes aos amostrados, assegurando a homogeneidade das áreas amostradas.

3.4.1 - TRANSFORMAÇÃO PARA VALORES DE RADIANCIA

Os números digitais amostrados foram transformados para radiancias espectrais utilizando a Equação 2.4.

Os valores $L_{m\acute{a}x}$ e L_{min} (Tabela 3.2) definem o "Post-Calibration Dynamic Range" estabelecido na calibração em terra, antes do lançamento. Estes valores foram atualizados pela recalibração da esfera integradora, sendo utilizados conforme a data de processamento da imagem analisada.

TABELA 3.2

RADIÂNCIAS ESPECTRAIS, L_{min} E $L_{m\acute{a}x}$ PARA O TM

TM "Post-calibration Dynamic Ranges"						
Radiâncias Espectrais $L_{m\acute{a}x}$ e L_{min} em $mW/cm^2 \cdot \mu m \cdot sr$						
Banda	Até Agosto/1983		Até Janeiro/1984		Após 15 Jan/84	
	L_{min}	$L_{m\acute{a}x}$	L_{min}	$L_{m\acute{a}x}$	L_{min}	$L_{m\acute{a}x}$
TM1	-0,152	15,842	0,000	14,286	-0,15	15,210
TM2	-0,284	30,817	0,000	29,125	-0,28	29,680
TM3	-0,117	23,463	0,000	22,500	-0,12	20,430
TM4	-0,151	22,432	0,000	21,429	-0,15	20,620
TM5	-0,037	3,242	0,000	3,000	-0,037	2,719
TM6	0,20	1,564	0,484	1,240	0,1238	1,560
TM7	-0,015	1,700	0,000	1,593	-0,015	1,438

FONTE: Markham e Barker (1986).

3.4.2 - TRANSFORMAÇÃO PARA VALORES DE REFLECTÂNCIA

Os valores de radiância obtidos pela Equação 2.4 foram convertidos para valores de reflectância pela Equação 2.5.

A Tabela 3.3 apresenta as irradiâncias solares médias no topo da atmosfera, para as bandas do TM.

TABELA 3.3

IRRADIÂNCIAS ESPECTRAIS EXOATMOSFÉRICAS PARA O TM

Irradiância espectral solar exoatmosférica para o TM
Esun (mW/cm² . μm)

Banda	Landsat-4	Landsat-5
TM 1	195,80	195,70
TM 2	182,80	182,90
TM 3	155,90	155,70
TM 4	104,50	104,70
TM 5	21,91	21,93
TM 7	7,457	7,452

FONTE: Markham e Barker (1986).

As distâncias Sol-Terra, para cada cena, utilizadas no cálculo das reflectâncias estão na Tabela 3.4.

TABELA 3.4

DISTÂNCIAS SOL-TERRA PARA OS DIAS DAS PASSAGENS ANALISADAS

DIA	DISTÂNCIA SOL-TERRA (Unidade Astronômica)
28/05/84	1,0133
15/05/85	1,0108
18/05/86	1,0113
21/05/87	1,0119
19/10/84	0,9955

FONTE: Almanagues Náuticos para 1984,
1985, 1986 e 1987.

Os ângulos zenitais solares no centro da área de estudo (Tabela 3.5) foram calculados com a seguinte equação (Walraven, 1978):

$$\cos \theta = \sin l \cdot \sin s + \cos s \cdot \cos l \cdot \cos H \quad (3.3)$$

onde:

l: latitude da área de estudo,

s: declinação solar para o momento da passagem do satélite,

H: ângulo horário para a passagem do satélite,

H: $T - A$,

T: tempo sideral local aparente,

A: ascensão reta aparente.

TABELA 3.5

ÂNGULOS ZENITAIS SOLARES CALCULADOS PARA AS PASSAGENS
ANALISADAS

DATA	ÂNGULO ZENITAL SOLAR
28/05/84	49,10°
15/05/85	46,90°
18/05/86	48,32°
21/05/87	48,83°
19/10/84	31,06°

A longitude e latitude da área de estudo foi determinada em cartas topográficas na escala de 1:50.000 e os demais valores, correspondentes a cada passagem, obtidos nos Almanques Náuticos para 1984, 1985, 1986 e 1987.

Já que nesta transformação não foi realizada nenhuma correção atmosférica, os valores calculados são, na realidade, valores referentes a radiâncias e reflectâncias

alvo-atmosfera ou radiâncias e reflectâncias aparentes. Os valores de reflectância também assumem a lambertinidade dos alvos e dos efeitos atmosféricos (Robinove, 1982 e Nelson, 1985a).

3.5 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

As passagens selecionadas apresentam condições atmosféricas semelhantes entre si. Os dados apresentados na Tabela 3.6 dão uma idéia das similaridades entre as condições atmosféricas nas datas analisadas e da precipitação 1, 3 e 6 dias antes.

Segundo Nelson (1985a), observações meteorológicas de superfície podem expressar as condições atmosféricas no momento da aquisição das imagens. A umidade relativa (UR) e a água precipitável representam a umidade das camadas mais superficiais e da coluna vertical, respectivamente. Como não se dispõe de dados sobre a concentração de aerossóis, a visibilidade horizontal pode caracterizar a transparência da atmosfera. A precipitação afeta o comportamento espectral dos alvos, na medida em que ela altera os seus teores de umidade, e a presença de nuvens próximas aos alvos aumenta a intensidade da radiância da trajetória, ou pode aumentar a intensidade da irradiação solar devido às reflexões.

Entretanto, não se sabe até que ponto o grau de semelhança entre os dados meteorológicos da Tabela 3.6 é suficiente para não provocar variações nas reflectâncias aparentes dos alvos de uma imagem para outra. E mesmo que as condições atmosféricas sejam semelhantes, os efeitos atmosféricos continuam presentes, alterando o comportamento espectral dos alvos. Assim, mesmo com condições atmosféricas semelhantes, necessita-se atenuar e/ou normalizar os efeitos atmosféricos.

TABELA 3.6

OBSERVAÇÕES METEOROLÓGICAS SUPERFICIAIS

Ano	Mes	Dia	Água prec. (pol.)	UR (%)	Prec. (mm)	Neb. (1/10)	VIS. (Km)
84	Maio	22			0		
	Maio	25			0		
	Maio	27			0		
	Maio	28	1,40	60	0	0	8
85	Maio	09			0		
	Maio	12			0		
	Maio	14			0		
	Maio	15	1,75	56	0	0	8
86	Maio	12			0		
	Maio	15			0		
	Maio	17			0		
	Maio	18	1,80	64	0	3	8
87	Maio	15			0		
	Maio	18			0		
	Maio	20			0		
	Maio	21	2,05	80	0	0	8
84	Out	13			0		
	Out	16			0		
	Out	18			0		
	Out	19	0,70	44	0	0	8

FONTE: INEMET (Instituto Nacional de Meteorologia)
Bom Jesus da Lapa (BA), 1988.

Como não se dispõe de dados de radiossondagem para os dias das passagens analisadas, resta como alternativa para a atenuação dos efeitos atmosféricos a aplicação de um método mais simples que utilize somente informações intrínsecas às imagens. Entre os vários métodos, destaca-se o método do número digital mínimo do histograma de cada banda. O método consiste em identificar nas imagens regiões de sombras de nuvens ou relevo, caracterizadas pela não incidência direta da radiação solar, ou ainda, de alvos como corpos d'água límpida e profundos que absorvem quase toda a radiação incidente. Nestas áreas, os números digitais são considerados contribuição do espalhamento atmosférico, e o menor valor encontrado em cada banda é subtraído de toda a cena.

Os valores de números digitais mínimos que foram subtraídos das imagens neste estudo foram determinados pelo método proposto por Chavez (1988). O método permite a seleção de modelo de espalhamento relativo para estimar os valores (ND) correspondentes ao efeito atmosférico aditivo (radiância da trajetória), normalizados para os ganhos e "off-sets" de cada banda espectral, a partir dos números digitais mínimos de apenas uma banda. O princípio é o mesmo do método descrito no parágrafo anterior, sendo que foram introduzidos os seguintes aperfeiçoamentos:

- Seleciona-se um número digital mínimo inicial, em uma das bandas do visível (TM1, TM2 e TM3), diretamente no histograma da imagem digital.
- Este valor inicial é utilizado para identificar o tipo de atmosfera (muito clara, clara, moderada, nebulosa ou muito nebulosa) que melhor represente a do momento da aquisição da cena. Para isto, Chavez fornece uma tabela onde para cada um

dos cinco tipos de atmosfera estão associados intervalos de números digitais mínimos iniciais.

- Conforme o tipo da atmosfera identificada, seleciona-se um modelo de espalhamento relativo que determinará os números digitais a serem subtraídos nas outras bandas. A Tabela 3.7 mostra os cinco tipos de atmosfera e os respectivos modelos de espalhamento associados.
- Os valores calculados com o modelo são normalizados para compensar as diferenças entre os ganhos e "offsets" característicos de cada banda espectral.

TABELA 3.7

CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS E MODELOS DE ESPALHAMENTO RELATIVO
ASSOCIADOS

Cond. Atmosféricas	Modelo de Espalhamento
Muito Clara	λ^{-4}
Clara	λ^{-2}
Moderada	λ^{-1}
Nebulosa	$\lambda^{-0,7}$
Muito Nebulosa	$\lambda^{-0,5}$

FONTE: Chavez (1988).

Assim, com os números digitais mínimos de uma banda determinam-se os valores a serem subtraídos das demais. Neste processo, a dependência entre os efeitos atmosféricos e o comprimento de onda é representada por um modelo de espalhamento relativo, próprio para as condições atmosféricas no momento da aquisição da cena.

Para a correção das bandas TM5 e TM7, Chavez sugere a utilização dos números digitais 0 e 1 independentemente do modelo utilizado para estimar os valores das outras bandas, porque os valores estimados pelo método são muito altos. Se estes valores fossem utilizados iriam zerar vários números digitais com boas informações. A causa para estes valores elevados não é clara, mas pode estar relacionada com a grande diferença entre os ganhos e "off-sets" das bandas TM5 e TM7 e os parâmetros das outras bandas.

Os números digitais obtidos com este método foram convertidos em radiâncias pela Equação 2.4 e subtraídos das radiâncias aparentes dos demais pontos amostrados, gerando radiâncias corrigidas. Os valores obtidos pela transformação das radiâncias corrigidas para reflectâncias são mencionados no texto como "reflectâncias corrigidas".

3.6 - PROCESSO DE ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS

De posse de todos os dados adquiridos conforme os procedimentos descritos até aqui - números digitais, radiâncias e reflectâncias aparentes e corrigidas - para cinco alvos, em seis bandas espectrais e cinco passagens diferentes duas questões foram preliminarmente verificadas:

- quais alvos são mais estáveis;
- se o emprego do método de Chavez (1988) contribuiu para normalizar os efeitos atmosféricos entre datas.

Para facilidade de identificação das imagens, serão elas referidas pela denominação de Data 1, 2, 3, 4 e 5, como segue:

- Data 1 = 28/05/84.

- Data 2 = 15/05/85.

- Data 3 = 18/05/86.

- Data 4 = 21/05/87.

- Data 5 = 19/10/84.

3.6.1 - AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS ALVOS

O comportamento espectral dos alvos selecionados foi considerado estável no tempo, devido à estabilidade de suas características físico-químicas superficiais. Mesmo assim, desejava-se identificar entre eles quais são os alvos menos estáveis, sujeitos a apresentarem variações ocasionais.

Assim, observaram-se quais alvos apresentam reflectâncias (aparentes e corrigidas) mais variáveis ao longo das cinco datas analisadas neste estudo. Para tanto, compararam-se os coeficientes de variação das médias das reflectâncias (aparentes e corrigidas) dos cinco alvos, nas cinco datas, para cada banda espectral separadamente.

Utilizou-se o coeficiente de variação de cada conjunto, porque ele expressa a variabilidade das amostras independentemente da magnitude dos valores médios. Ou seja, o coeficiente de variação representa a variabilidade (dispersão) relativa das amostras em relação

aos seus valores médios, sendo a razão entre a dispersão absoluta (desvio padrão) e a média amostral.

3.6.2 - AVALIAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS COM O MÉTODO DE CHAVEZ (1988)

Esta avaliação objetiva reforçar a suposição de que os efeitos atmosféricos foram normalizados com o emprego do método de Chavez (1988). Aqui, não se pretende avaliar quanto o emprego deste método aproxima os valores de reflectâncias das imagens aos valores de reflectâncias reais dos alvos, mas, sim, avaliar se a correção atmosférica aproximou os valores de reflectância entre cenas, diminuindo a variabilidade dos dados.

Escolheram-se dois pares de cenas para serem analisados separadamente: um par com condições de iluminação semelhantes (Data 1 e Data 4) e um par com condições diferentes (Data 1 e Data 5). Assim, a correção será testada nas duas situações presentes neste estudo.

Calcularam-se as distâncias euclidianas entre as reflectâncias aparentes de uma cena e as reflectâncias aparentes da outra cena, para cada alvo e banda espectral. Fez-se o mesmo para as reflectâncias corrigidas de cada alvo, banda e par de cenas. Assim para cada par de cenas (Data 1 e 4 e Data 1 e 5), alvo e banda espectral, têm-se as distâncias euclidianas entre as reflectâncias aparentes e entre as reflectâncias corrigidas das duas datas.

Caracterizaram-se as populações usando médias amostrais ($\bar{X}$) e desvios padrão amostrais (S). Assim a uma população associa-se $(\bar{X}, S)$, um ponto em $R = R \times R$, sendo R o conjunto de pares de números reais. Em R é usual

medir a distância entre dois pontos (X1,Y2) e (X2,Y2) pela distância euclidiana (D):

$$D^2 = (X1 - X2)^2 + (Y1 - Y2)^2 \quad (3.2)$$

onde:

X1 : média das reflectâncias na data M;

X2 : média das reflectâncias na data N;

Y1 : DP desvio padrão das reflectâncias na data M;

Y2 : DP das reflectâncias na data N.

A avaliação consistiu na comparação entre as distâncias euclidianas das reflectâncias aparentes e as distâncias euclidianas das reflectâncias corrigidas. Se a correção diminuiu a variabilidade dos valores de reflectância, as distâncias euclidianas entre as reflectâncias corrigidas serão menores. Ou seja, a correção atmosférica tornou as reflectâncias dos alvos mais semelhantes de uma data para a outra. Isto é uma evidência da normalização dos efeitos atmosféricos, visto que os alvos analisados são estáveis, e por isto, devem apresentar os mesmos valores de reflectância nas duas datas.

3.7 - PROCESSO DE ANÁLISE FINAL DOS DADOS

Após as avaliações preliminares realizaram-se as análises para atender aos objetivos específicos. A seguir são descritos os procedimentos adotados, relacionando-os aos objetivos específicos que estão atendendo.

3.7.1 - ANÁLISE 1 - CENAS DE 28/05/84 E 19/10/84 (DATA 1 E DATA 5) - CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO DIFERENTES

Esta análise visa atender ao primeiro objetivo: avaliar se a transformação dos números digitais para reflectâncias minimiza as diferenças entre o comportamento espectral dos alvos, causados por variações nas condições de iluminação.

Para isto, agruparam-se os números digitais e reflectâncias aparentes de uma cena com os valores correspondentes da outra cena, para cada alvo em uma determinada banda espectral. Assim, para cada alvo, em cada uma das seis bandas espectrais, obteve-se um conjunto com os números digitais das duas cenas e um conjunto com as reflectâncias das mesmas duas cenas. Utilizaram-se os valores aparentes, pois o que se deseja avaliar é a redução na variabilidade dos alvos com a transformação dos números digitais para reflectâncias. Se os números digitais e reflectâncias corrigidas para os efeitos atmosféricos fossem comparados, não se poderia discriminar a redução devida à correção atmosférica da redução devida a transformação para reflectâncias pura e simples. Além disto, se existirem variações nas condições atmosféricas entre datas, elas estarão afetando igualmente as observações expressas por números digitais e as expressas por reflectâncias.

A avaliação consistiu na comparação dos coeficientes de variação (CV) (para não haver problemas de escala) dos conjuntos de observações expressos em números digitais com os expressos em reflectâncias. Se as diferenças provocadas pelas condições de iluminação forem reduzidas ou eliminadas com a transformação, os coeficientes de variação dos conjuntos de observações expressas por reflectâncias serão menores, já que o

comportamento espectral dos alvos é estável entre as duas datas.

3.7.2 - ANÁLISE 2 - CENAS DE 28/05/84, 15/05/85, 18/05/86 E 21/05/87 - (DATA 1, 2, 3 E 4) CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO SEMELHANTES

Com esta análise pretende-se atingir ao segundo objetivo deste estudo que é a avaliação da estabilidade radiométrica do sensor TM/Landsat-5, em órbita, no intervalo de tempo abrangido por esta investigação - 1984 a 1987.

Como selecionaram-se alvos estáveis no tempo, cenas com condições de iluminação semelhantes e supôs-se que a correção com o método de Chavez (1988) tenha normalizado as possíveis variações nos efeitos atmosféricos, acredita-se que qualquer variação significativa na reflectância dos alvos, entre datas, seja causada por algum desajuste nas propriedades radiométricas do sistema sensor.

Para testar se a variabilidade dos valores de reflectância (aparentes e corrigidas) de um ano para outro é significativa, aplicou-se o teste de análise de variância (ANOVA). O teste se baseia na comparação de duas estimativas independentes da variância populacional comum (V). Essas estimativas são obtidas dividindo-se a variabilidade total dos dados em duas componentes.

S1: Estimativa de V baseada em k-1 graus de liberdade. Expressa a variabilidade entre as populações (erro experimental e adicionalmente qualquer outra variação).

S2: Estimativa de V baseada em $k(n-1)$ graus de liberdade. Expressa a variabilidade dentro das populações (erro experimental).

Quando H_0 é verdadeira a razão $F_c = S_1^2/S_2^2$ é um valor da variável aleatória F tendo distribuição f com $(k-1)$ e $k(n-1)$ graus de liberdade. Uma vez que S_1 superestima a variância populacional comum (V) quando H_0 é falsa, tem-se um teste unilateral com a região crítica inteiramente na cauda direita da distribuição. A hipótese nula é rejeitada ao nível α de significância quando $F_c > F_{\alpha}(k-1, k(n-1))$. Neste caso S_1 é relativamente grande em comparação com a variabilidade dentro da população, e a razão F_c tende a ser maior. Portanto, quanto maior for o valor F , menor será a credibilidade da hipótese nula.

O teste foi aplicado para cada alvo, em cada banda separadamente. Assim têm-se 4 populações (anos) por banda, com amostras de tamanhos iguais. Trata-se da análise de variância para um fator. A hipótese nula será - H_0 : o efeito temporal não é significativo ou as médias populacionais são iguais nas quatro datas.

Os testes foram realizados com o algoritmo BASIS (Burroughs Advanced Statistical Inquiry System), que está descrito em Burroughs (1975).

Antes de aplicar este teste verificaram-se as condições de homocedasticidade exigidas.

3.7.3 - ANÁLISE 3 - CENA DE 28/05/84 (DATA 1)

Esta análise atende ao terceiro objetivo que visa comparar os números digitais e reflectâncias de diferentes alvos nas imagens, entre eles, e com as medidas de reflectância obtidas em campo, em trabalhos anteriores.

Também pretende-se verificar quais os valores (números digitais e reflectâncias, aparentes e corrigidas) que mais se aproximam do comportamento esperado (real) para os alvos analisados.

Escolheu-se a cena de 28/05/84 para esta análise, porque se acredita que nesta cena haverá menor probabilidade de disfunções do sistema sensor ou, pelo menos, julga-se que ele estaria mais perto dos padrões de pré-lançamento.

A análise realizou-se em duas etapas:

- Traçaram-se espectros com os números digitais, números digitais corrigidos para os efeitos atmosféricos com o método de Chavez (1988), reflectâncias aparentes e reflectâncias corrigidas dos diferentes tipos de alvos, e verificou-se, comparativamente, qual o grau de correspondência que estes valores exibiam.
- Depois foram comparados os espectros de reflectância obtidos da conversão dos números digitais das imagens com os espectros de radiometria de campo, obtidos em trabalhos anteriores, para avaliar qual a relação entre os espectros das imagens e os espectros de alvos em campo.

Para tal comparação utilizaram-se as seguintes curvas de referência:

- Litologias (Alvos 1, 2 e 3): espectros levantados em campo por Meneses (1986) sobre os alvos em questão (Figuras 3.2, 3.4 e 3.6).

- Vegetação (Alvo 4): espectro determinado sobre folhagens de cerrado por Vitorello, 1989 (Figura 3.8).
- Água (Alvo 5): espectro de águas fluviais túrbidas (Figura 3.9).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados que serviram de base para o presente trabalho são apresentados e discutidos neste capítulo. No Apêndice A encontram-se as médias e desvios padrão dos números digitais amostrados em cada banda espectral, para cada alvo nas cinco datas, e seus respectivos valores de reflectâncias aparentes e corrigidas.

4.1 - AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS ALVOS

As Tabelas 4.1 a e b apresentam os coeficientes de variação calculados com as médias das reflectâncias aparentes e com as médias das reflectâncias corrigidas de um mesmo alvo, nas quatro datas com condições de iluminação iguais (a), e nas cinco datas (b), para cada banda espectral respectivamente (dados do Apêndice A).

O exame da Tabela mostra que as reflectâncias aparentes e corrigidas dos Alvos 3, 2 e 1 apresentam coeficientes de variação menores do que os dos Alvos 4 e 5. O Alvo 3 é o mais estável na maioria das bandas analisadas, seguido dos Alvos 1 e 2. Tais resultados correspondem à expectativa, uma vez que os Alvos 1, 2 e 3 são rochas das quais se espera maior estabilidade em suas propriedades superficiais do que de um corpo d'água (Alvo 5) ou de uma cobertura vegetal (Alvo 4).

TABELA 4.1

COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES NAS QUATRO DATAS
COM CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO SEMELHANTES (a) E NAS
CINCO DATAS (b) EXPRESSAS POR REFLECTÂNCIAS
APARENTES (Ra) E POR REFLECTÂNCIAS
CORRIGIDAS (Rc)

ALVO		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
A1	Ra	5,60	3,50	4,70	4,20	2,50	6,70
	Rc	10,40	8,50	4,60	4,10	2,30	6,10
A2	Ra	3,60	4,50	4,80	3,90	2,40	3,90
	Rc	12,80	8,90	8,30	4,90	1,39	7,83
A3	Ra	3,20	2,70	3,80	4,40	0,88	4,20
	Rc	7,90	4,10	3,10	5,60	0,76	4,41
A4	Ra	4,70	2,70	4,50	7,50	2,60	23,00
	Rc	30,60	8,20	0,30	7,50	2,76	26,85
A5	Ra	2,20	0,90	5,50	0,70	18,20	39,90
	Rc	23,40	11,30	17,20	20,10	13,97	32,19

a)

ALVO		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
A1	Ra	11,70	15,10	17,60	13,60	17,10	21,70
	Rc	12,70	12,20	7,00	9,60	12,90	18,90
A2	Ra	9,40	14,60	17,40	15,10	14,10	13,40
	Rc	13,60	24,00	16,10	16,30	10,84	16,42
A3	Ra	7,9	10,70	11,80	9,90	7,10	11,00
	Rc	11,50	12,20	9,80	9,80	6,01	9,82
A4	Ra	16,20	22,00	33,60	12,70	19,40	61,00
	Rc	26,40	12,40	14,30	27,00	16,30	44,30
A5	Ra	10,50	15,70	24,00	38,00	30,10	161,00
	Rc	32,30	28,00	27,00	34,00	61,02	118,90

b)

Serão considerados estáveis os Alvos 1, 2 e 3. O comportamento espectral dos Alvos 4 e 5, apesar de ser estável em algumas bandas, varia ocasionalmente. Este fato deve ser considerado na análise dos resultados que seguem.

4.2 - AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE CHAVEZ (1988)

a) Para as Datas 1 e 4 (28/05/84 e 21/05/87)

Nos gráficos da Figura 4.1 estão plotadas as distâncias euclidianas entre as observações das Datas 1 e 4, expressas pelas reflectâncias aparentes e pelas reflectâncias corrigidas, para cada alvo e banda espectral.

As distâncias euclidianas entre as reflectâncias corrigidas são menores do que entre as reflectâncias aparentes, para a maioria dos alvos, nas bandas TM1, TM2, TM3 e TM4. Nas bandas TM5 e TM7 são levemente maiores, ou iguais.

Como os alvos, principalmente o 1, 2 e 3, apresentam um comportamento espectral estável de uma data para a outra, a aproximação dos valores de reflectância das duas datas demonstra que a correção atmosférica aplicada conforme os procedimentos descritos na Seção 3.5, diminuiu a variabilidade dos valores de reflectância, de uma data para a outra, nas bandas TM1, TM2, TM3 e TM4. A única exceção é o Alvo 5 na banda TM2 (Figura 4.1e), apresentando uma distância euclidiana maior entre as reflectâncias corrigidas. Presume-se que este maior valor seja causado por algum tipo de mudança nas características superficiais deste alvo, da Data 1 para a Data 4, que se tenha tornado mais acentuada após a correção.

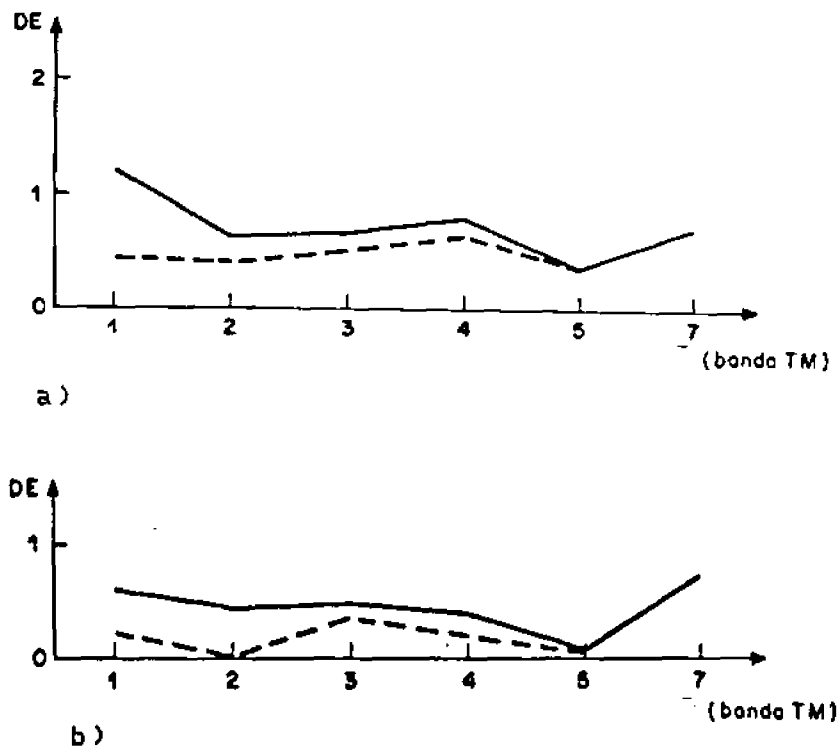
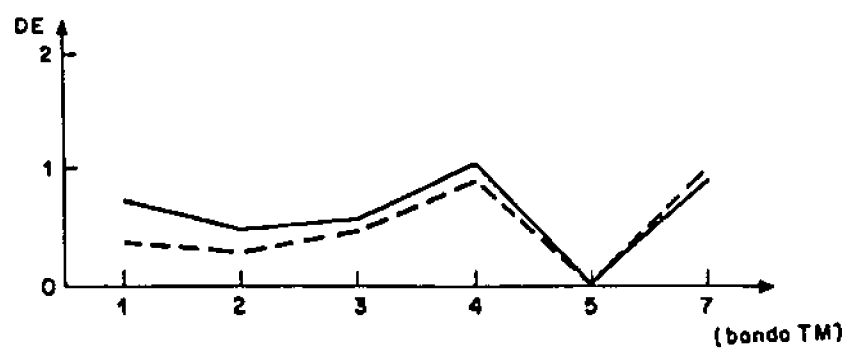
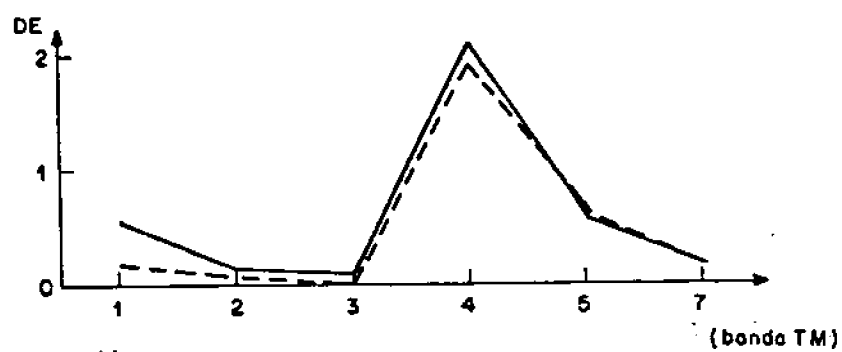


Fig. 4.1 - Distâncias euclidianas (DE) entre as observações das Datas 1 e 4, expressas por reflectâncias aparentes (—) e reflectâncias corrigidas (-----) para os Alvos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).

(Continua)



c)



d)



e)

Fig. 4.1 - Conclusão.

Nas bandas TM5 e TM7, o pequeno aumento, ou a inalteração das distâncias euclidianas, após a correção, indicam a ineficiência do método para normalizar os efeitos atmosféricos, mesmo que sutis, nestas bandas. Segundo Chavez (1988), nesta região do espectro, a quantidade de espalhamento atmosférico que ocorre pode ser desconsiderada, exceto para atmosferas muito nebulosas. Assim o autor, depois de constatar que o seu método estimava valores muito altos para a correção destas bandas, como foi comentado na Seção 3.5, indicou a utilização dos números digitais 0 e 1 para a correção, independentemente do modelo utilizado para as outras bandas. Neste estudo, utilizaram-se os valores 1 e 2, respectivamente, para a correção das bandas TM7 e TM5, uma vez que os valores amostrados diretamente no histograma de cada banda e sobre as águas do Rio Corrente (Tabela 4.2) foram expressivamente maiores. Mesmo assim, a correção alterou muito pouco a diferença entre o comportamento espectral dos alvos nas duas datas.

As cenas das Datas 1 e 4 apresentam condições de iluminação semelhantes, assim como as cenas das Datas 2 e 3. Estas cenas também apresentam valores para a correção destes efeitos muito parecidos, como pode ser observado na Tabela 4.2 (3ª coluna). Por isto, os resultados obtidos com as cenas das Datas 1 e 4, provavelmente seriam os mesmos, caso o teste fosse realizado com outro par de cenas, ou com todas as quatro cenas com condições de iluminação iguais.

TABELA 4.2

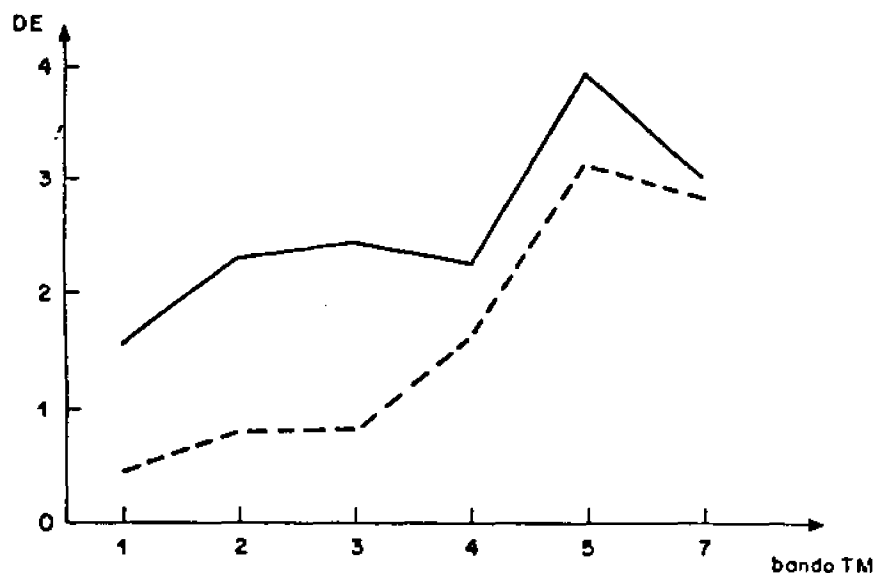
NÚMEROS DIGITAIS PARA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA OBTIDOS COM O
MÉTODO DE CHAVE (1988), NO HISTOGRAMA DE CADA BANDA
E SOBRE O RIO GRANDE

DATA	BANDA	CHAVEZ	ND MIN. HISTOGRAMA	RIO CORRENTE
1	TM1	43,00	43,00	50,40
	TM2	14,70	14,00	20,00
	TM3	9,90	12,00	15,86
	TM4	5,38	13,00	7,72
	TM5	2,00	12,00	5,00
	TM7	1,00	3,00	1,20
2	TM1	46,00	46,00	55,22
	TM2	15,60	15,00	21,80
	TM3	10,50	10,00	17,70
	TM4	5,60	11,00	7,80
	TM5	2,00	9,00	5,40
	TM7	1,00	2,00	1,60
3	TM1	38,00	38,00	52,92
	TM2	13,35	14,00	21,00
	TM3	9,01	11,00	18,10
	TM4	4,97	12,00	8,20
	TM5	2,00	2,00	9,20
	TM7	1,00	5,00	2,40
4	TM1	41,00	41,00	51,12
	TM2	14,21	14,00	20,96
	TM3	9,60	10,00	16,04
	TM4	5,21	12,00	6,60
	TM5	2,00	9,00	6,08
	TM7	1,00	2,00	1,72
5	TM1	78,00	78,00	85,90
	TM2	32,27	30,00	36,36
	TM3	29,80	32,00	34,80
	TM4	20,31	16,00	20,28
	TM5	2,00	45,00	19,43
	TM7	1,00	20,00	9,12

b) Para as Datas 1 e 5 (28/05/84 e 19/10/84)

Os gráficos da Figura 4.2 apresentam as distâncias euclidianas entre as observações das Datas 1 e 5, expressas pelas reflectâncias aparentes e pelas reflectâncias corrigidas, para cada alvo e banda espectral.

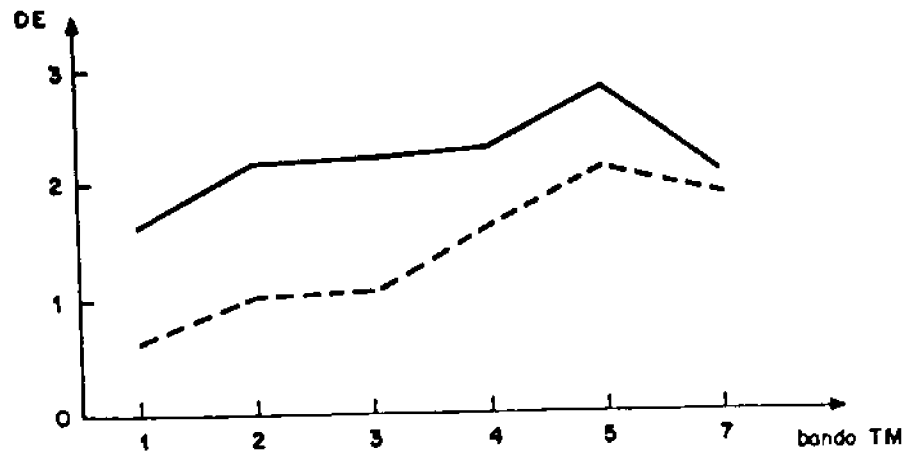
As distâncias euclidianas entre as reflectâncias corrigidas são menores do que as distâncias euclidianas entre as reflectâncias aparentes, para a maioria dos alvos e bandas espectrais. As únicas exceções são o Alvo 4 na banda TM4 e o Alvo 5 na banda TM7.



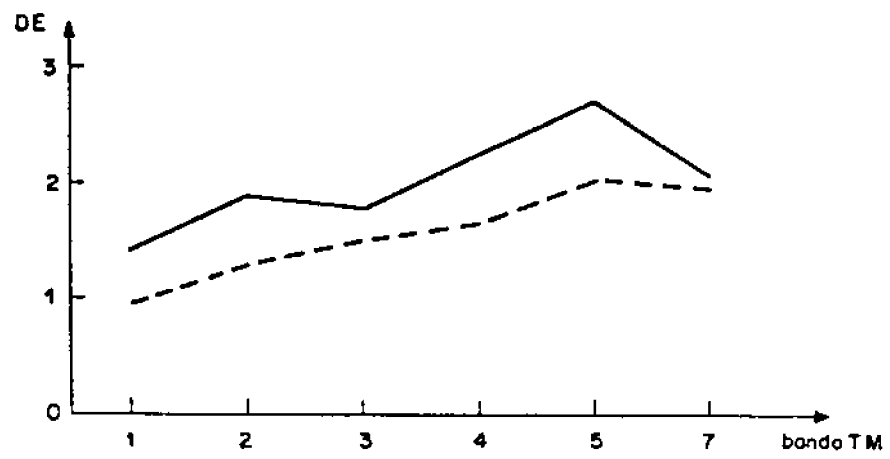
a)

Fig. 4.2 - Distâncias euclidianas (DE) entre as observações das Datas 1 e 5, expressas por reflectâncias aparentes (—) e reflectâncias corrigidas (---) para os Alvos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).

(Continua)

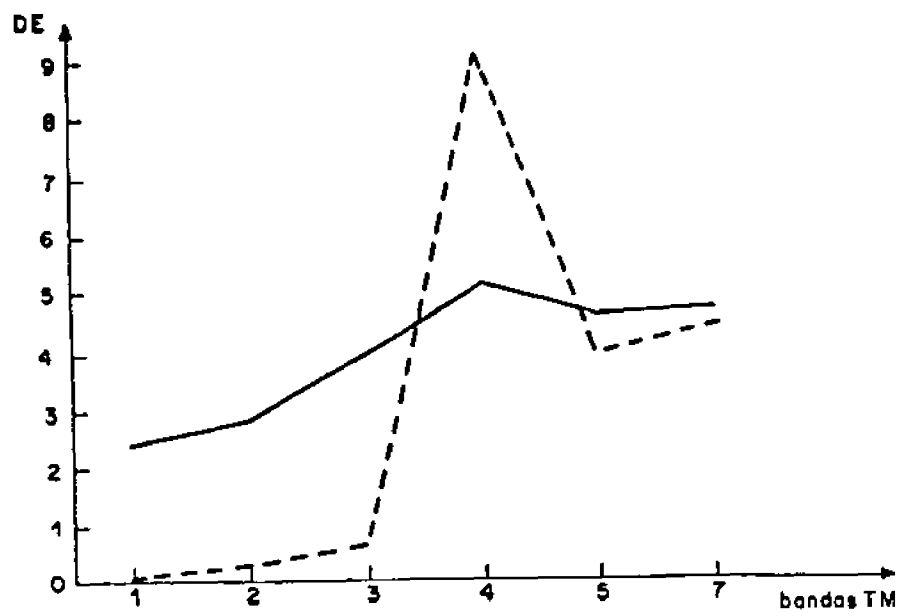


b)

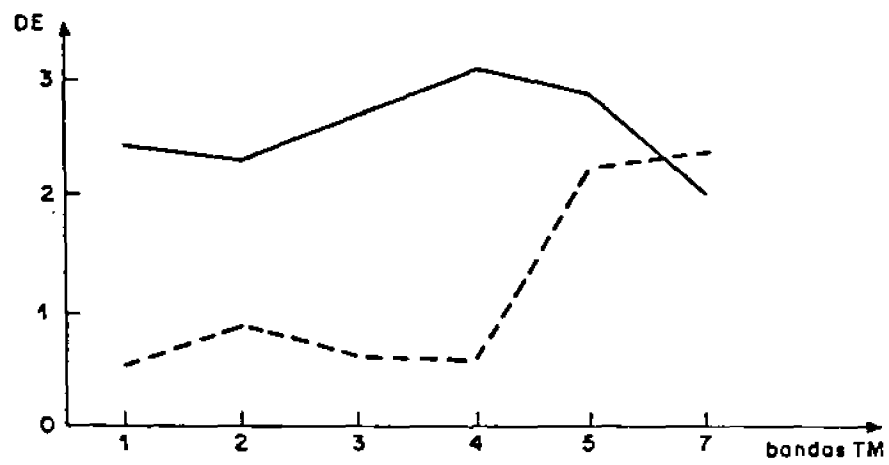


c)

Fig. 4.2 - Continuação



d)



e)

Fig. 4.2 - Conclusão.

A correção atmosférica também aproximou os valores de reflectância das duas cenas obtidas com condições de iluminação diferentes. Como os alvos (principalmente os Alvos 1, 2 e 3) mantiveram-se estáveis, teoricamente deveriam apresentar os mesmos valores de reflectâncias nas duas datas. Por isso, a diminuição da distância euclidiana entre os valores de reflectância das Datas 1 e 5, indica a redução na variabilidade dos dados devida aos efeitos atmosféricos.

Por serem exceções, as distâncias euclidianas maiores entre as reflectâncias corrigidas para o Alvo 4 na banda TM4 e para o Alvo 5 na banda TM7, devem ser causadas por mudanças das características superficiais dos alvos, entre estas datas, mudanças que são realçadas, ou tornam-se perceptíveis, com a correção. As Figuras 4.3 e 4.4 mostram, respectivamente, as reflectâncias aparentes e as reflectâncias corrigidas para o Alvo 4 nas Datas 1 e 5. Percebe-se como, após a correção, a diferença entre as reflectâncias das duas datas, na banda TM4, foi salientada.

Apesar do método ter normalizado os efeitos atmosféricos entre datas, detectaram-se alguns problemas relacionados à sua utilização na correção de dados que são transformados para radiâncias e/ou reflectâncias.

O método de Chavez apresenta cinco modelos para o cálculo dos números digitais mínimos a serem subtraídos dos números digitais das bandas TM. A escolha do modelo mais adequado às condições atmosféricas no momento da aquisição da imagem, baseia-se no número digital mínimo do histograma de uma das bandas do visível. Neste trabalho escolheu-se a banda TM1.

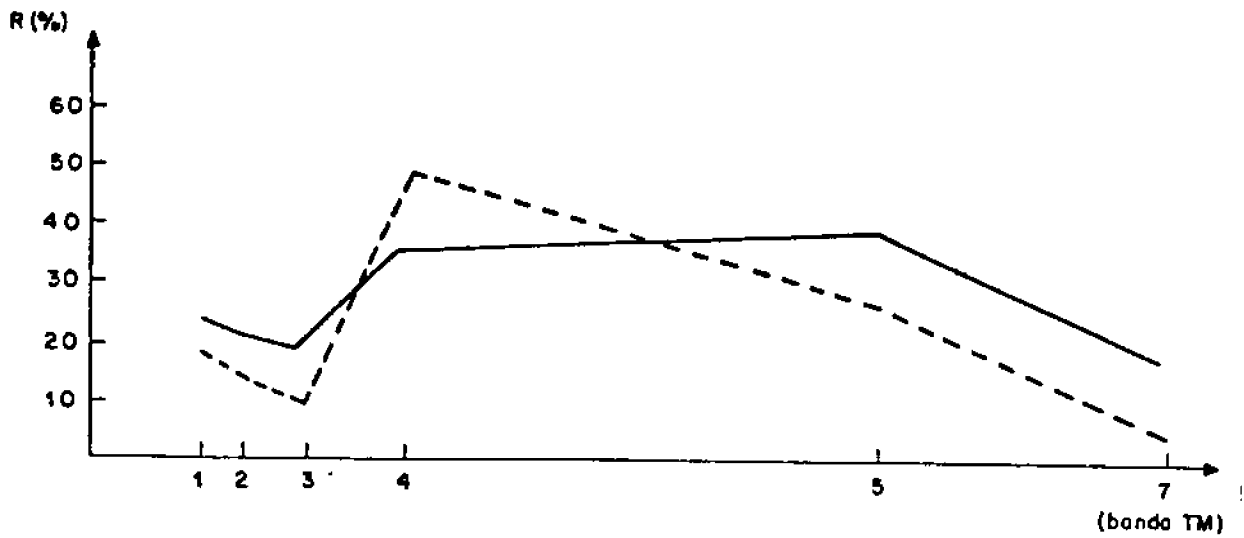


Fig. 4.3 - Reflectâncias aparentes (R^*_{255}) para o Alvo 4 (vegetação) nas Datas 1 (---) e 5 (—).

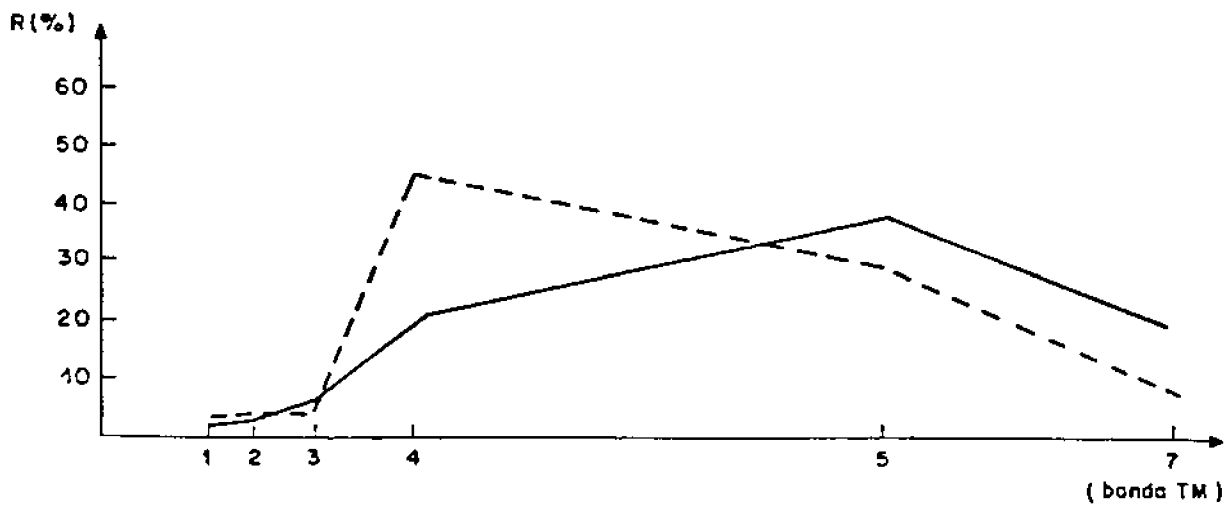


Fig. 4.4 - Reflectâncias corrigidas (R^*_{255}) para o Alvo 4 (vegetação) nas Datas 1 (---) e 5 (—).

Nas Datas 1, 2, 3 e 4, o modelo selecionado foi o de atmosfera "muito clara", pois os valores digitais mínimos na banda TM1 variam entre 38 e 46 (Tabela 4.2). Para a Data 5, o número digital mínimo 78, na banda TM1, indica uma atmosfera "moderada". Entretanto, optou-se pelo uso do modelo de atmosfera "clara". Uma das causas foi o fato do valor 78 cair, exatamente, no limite entre atmosferas "claras" e "moderadas". Outro fator que pesou na opção pelo modelo de atmosfera "clara" foi o fato da cena ter sido obtida com uma geometria de iluminação que favorece valores digitais elevados (ângulo zenital solar pequeno), independentemente das condições atmosféricas. A Figura 4.5 mostra a diferença entre os valores estimados pelos dois modelos.

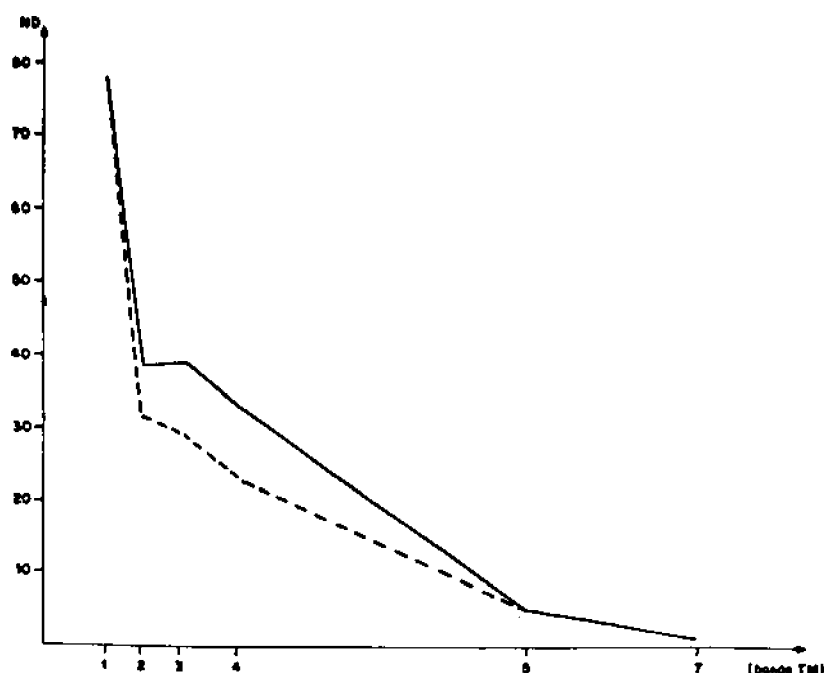
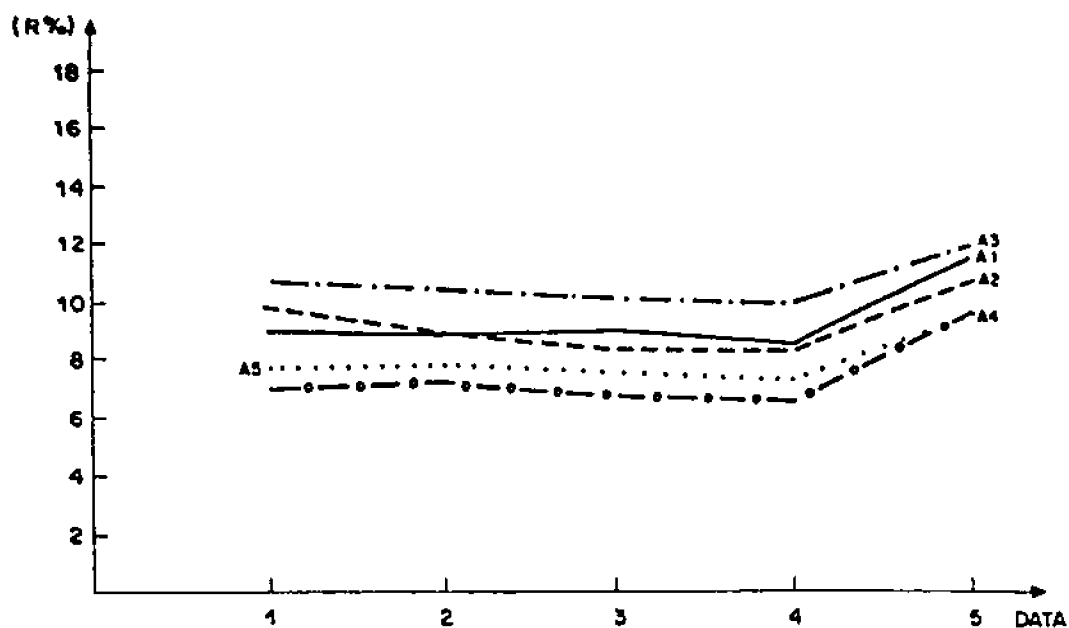


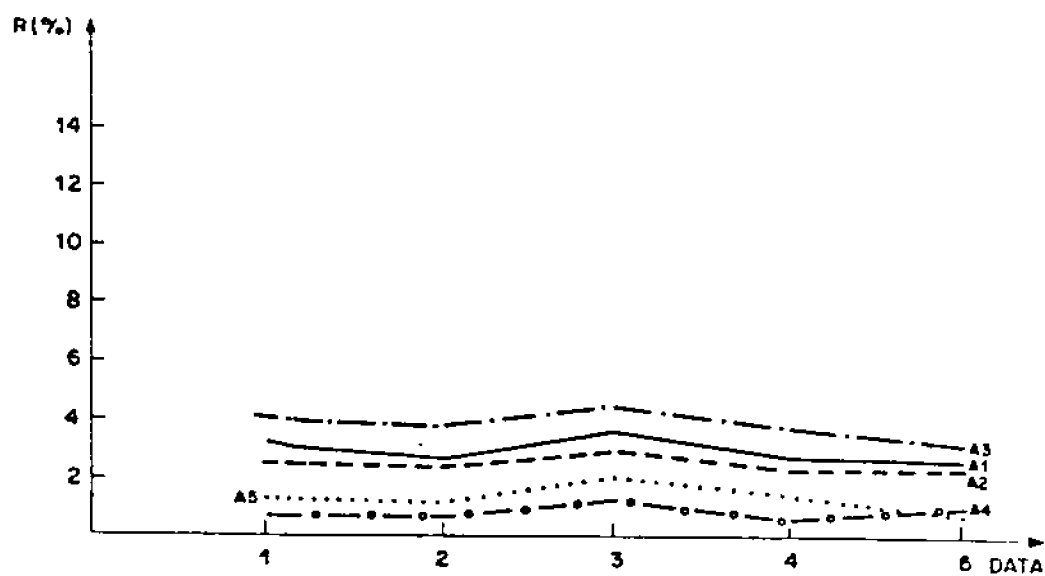
Fig. 4.5 - Números digitais estimados para a Data 5, a partir do número digital na banda TM1 (78), pelos modelos de atmosfera "clara" (---) e "moderada" (—) de Chavez.

Mesmo utilizando os valores estimados pelo modelo de atmosfera "clara", as reflectâncias corrigidas da Data 5 ficaram menores do que o esperado, ou seja, os valores aparentes foram supercorrigidos. Nos gráficos das Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, pode-se observar os valores de reflectâncias aparentes e de reflectâncias corrigidas para cada alvo, ao longo das cinco datas, nas seis bandas analisadas. Nas bandas TM2, TM3 e TM4 as reflectâncias aparentes assumiram, na Data 5, valores menores do que nas outras datas. Nas bandas TM5 e TM7 as reflectâncias não foram supercorrigidas, mantendo a mesma relação com as reflectâncias das outras datas após a correção, porque, conforme indicação do método, os valores para correção destas bandas são sempre os mesmos, independentemente do tipo de atmosfera presente.

A causa para a supercorreção é o fato do número digital 78 ser mais alto do que os valores mínimos das outras cenas, porque o ângulo zenital solar na Data 5 era menor e não porque a atmosfera fosse mais turbida. Assim, baseado em um valor inicial alto, independentemente das condições atmosféricas, selecionou-se um modelo que superestimou os efeitos atmosféricos e, conseqüentemente, os números digitais a serem subtraídos nas outras bandas.

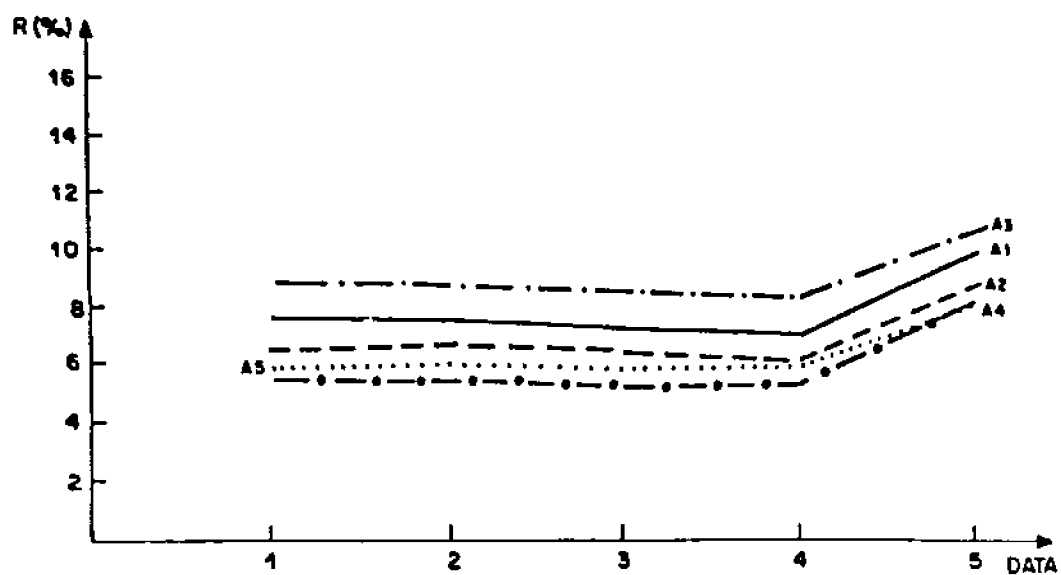


a)

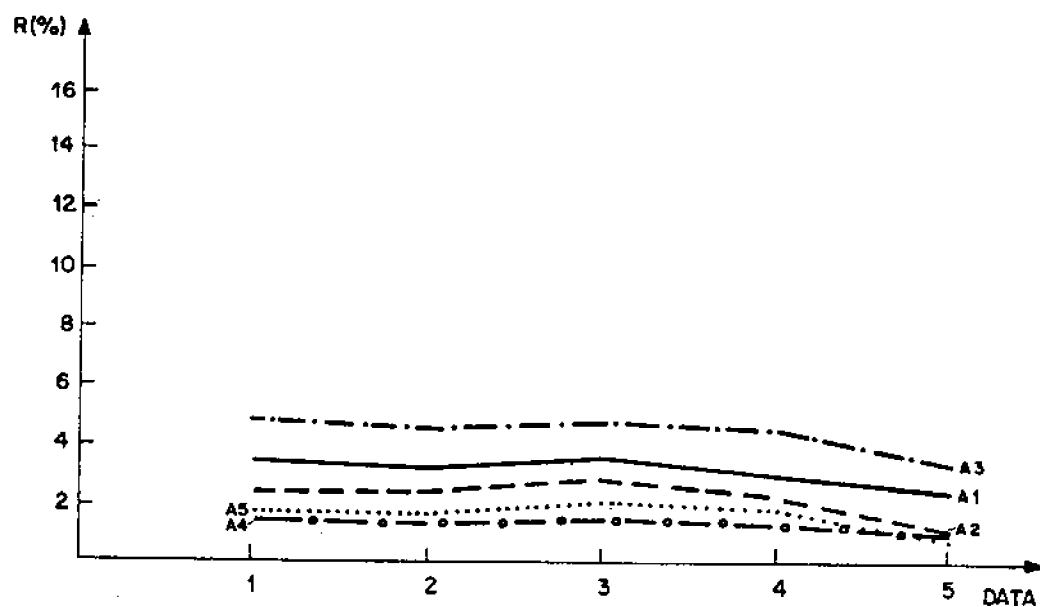


b)

Fig. 4.6 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4, e 5 na banda TM1, ao longo das cinco datas.

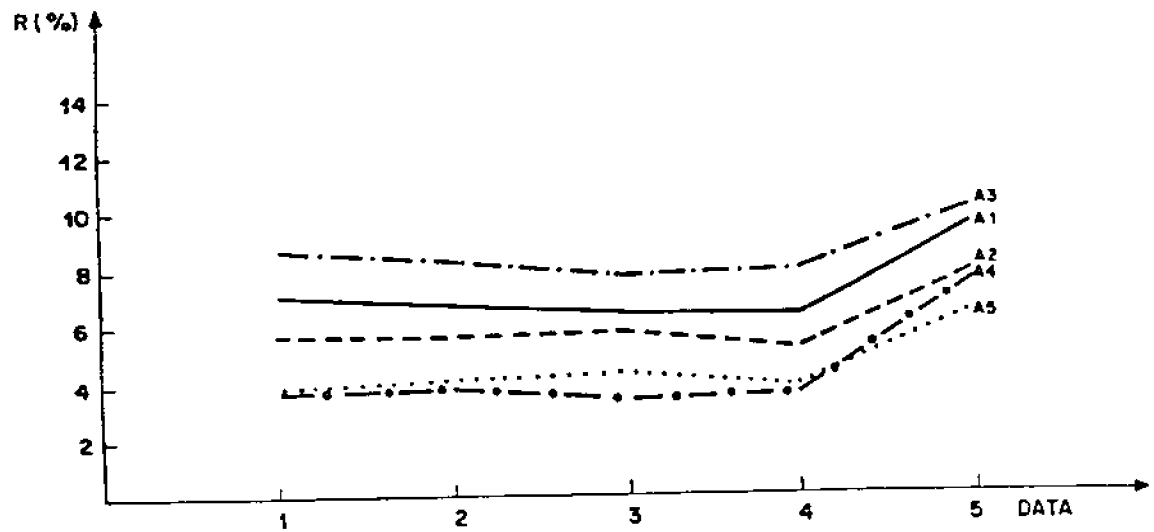


a)

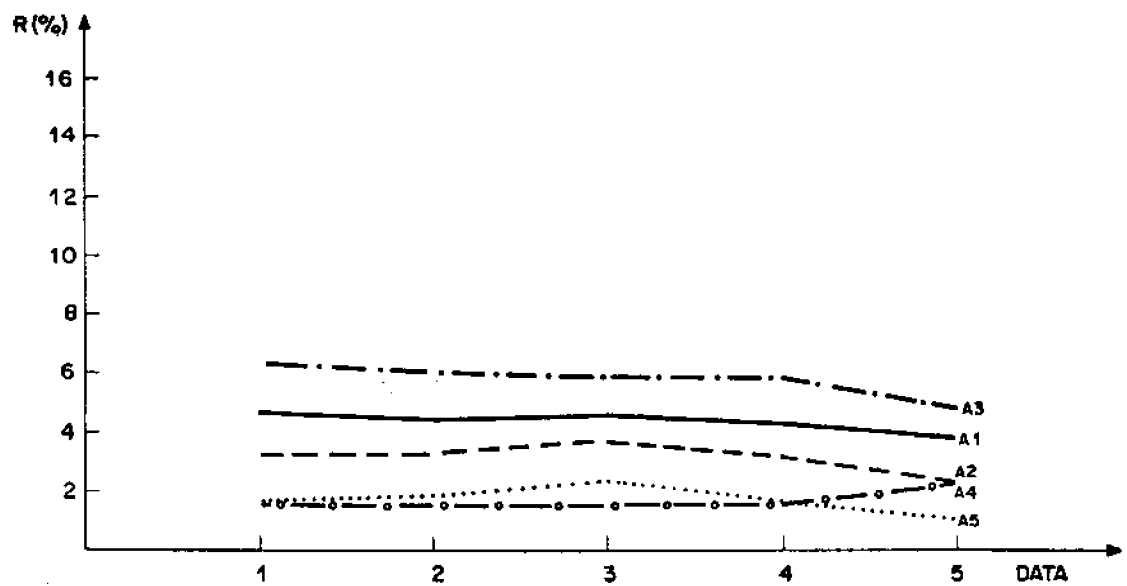


b)

Fig. 4.7 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM2, ao longo das cinco datas.

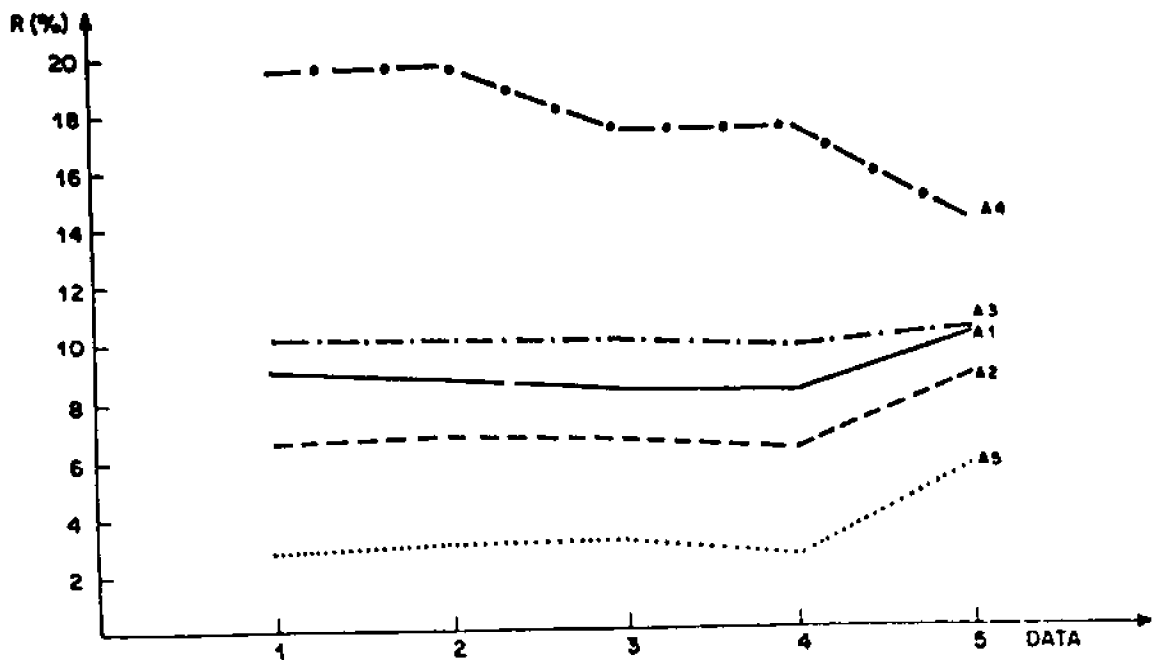


a)

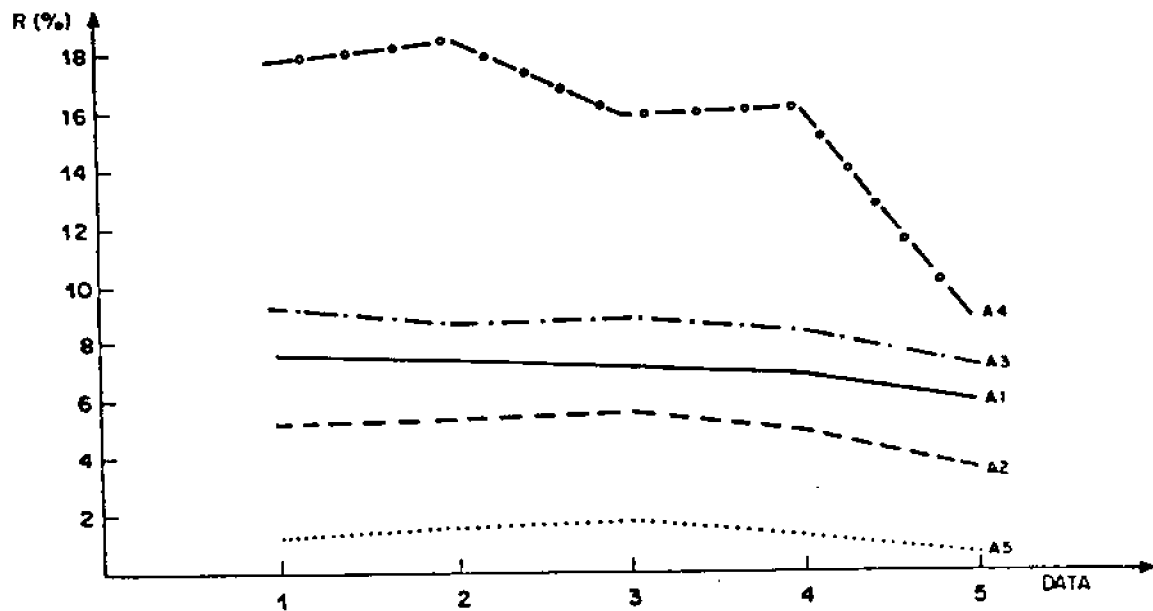


b)

Fig. 4.8 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM3, ao longo das cinco datas.

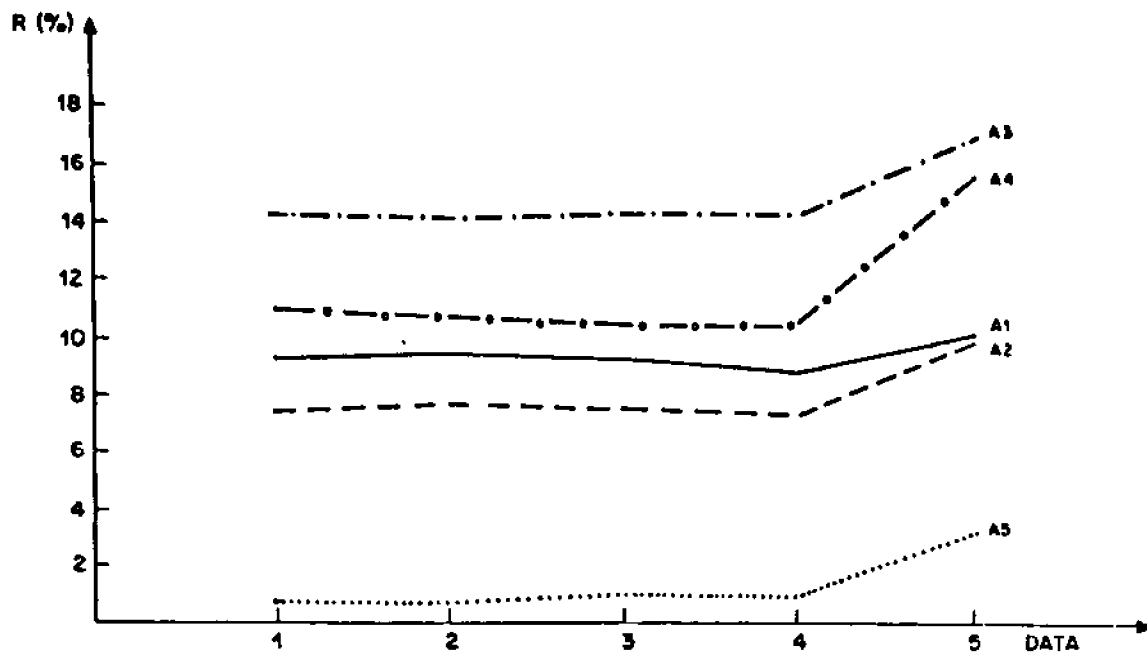


a)

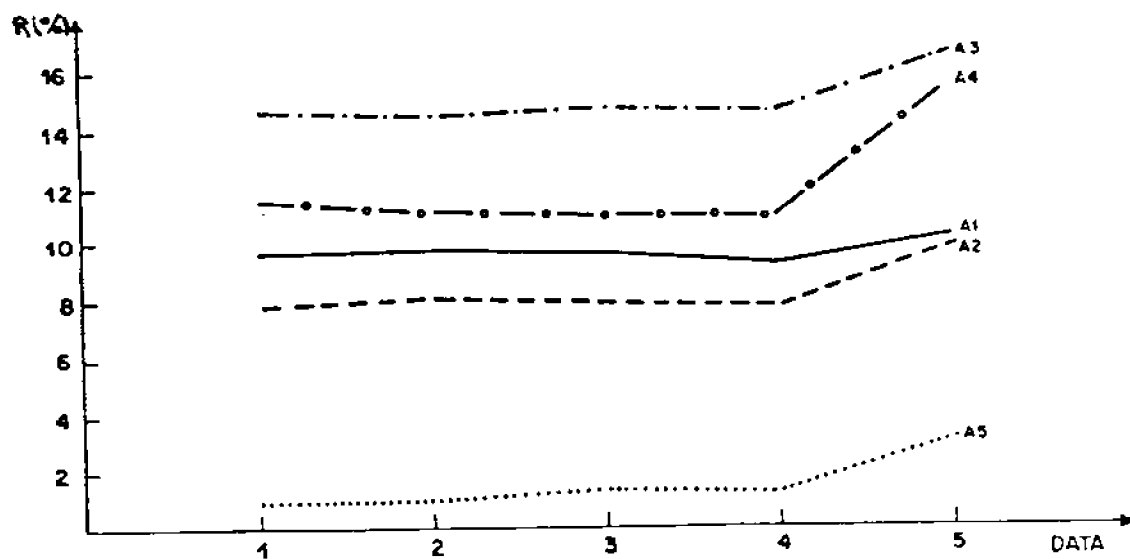


b)

Fig. 4.9 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM4, ao longo das cinco datas.

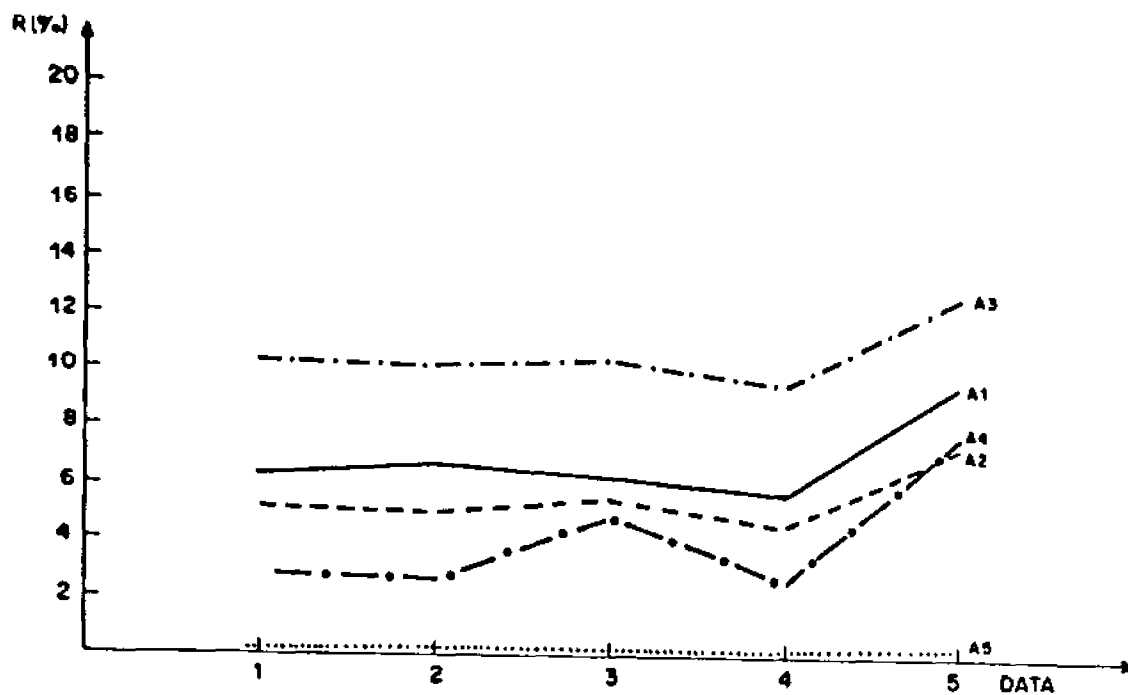


a)

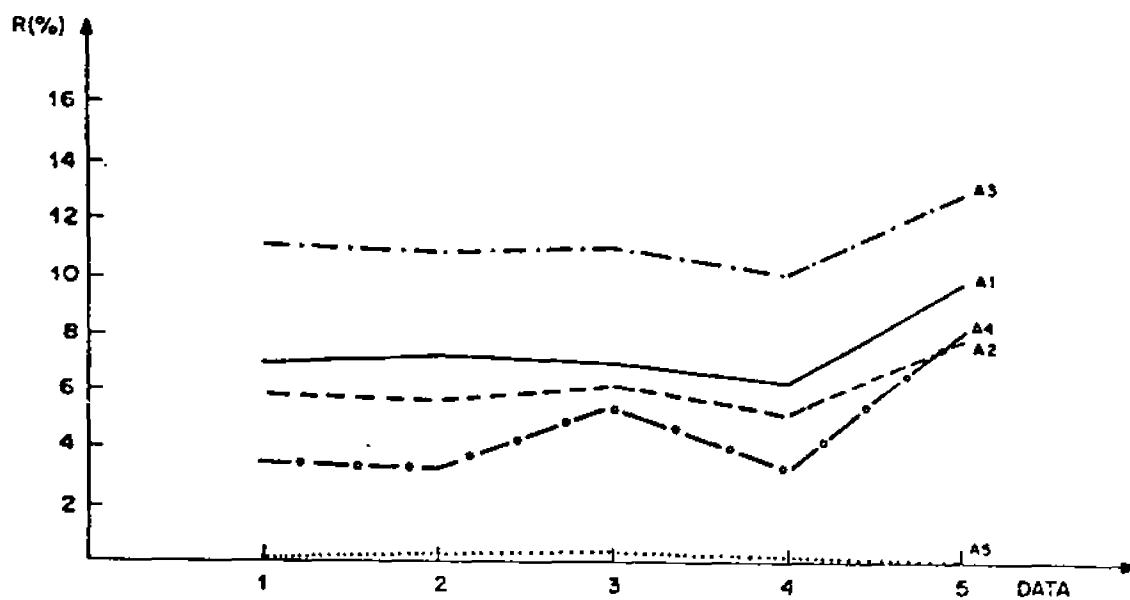


b)

Fig. 4.10 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM5, ao longo das cinco datas.



a)



b)

Fig. 4.11 - Comportamento das reflectâncias aparentes (a) e reflectâncias corrigidas (b) dos Alvos 1, 2, 3, 4 e 5 na banda TM7, ao longo das cinco datas.

Nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 observa-se o comportamento espectral do Alvo 1 expresso, respectivamente, por números digitais, números digitais corrigidos e reflectâncias corrigidas. Na Figura 4.13 percebe-se que o método de correção tornou os números digitais da Data 5 praticamente iguais aos números digitais da Data 1, nas bandas TM1, TM2, TM3, e TM4, normalizando as condições atmosféricas e de iluminação, indiscriminadamente. Quando os números digitais são transformados para reflectâncias corrigidas, são compensadas, agora corretamente, as condições de iluminação (Figura 4.14), e os valores da Data 5 tornam-se menores do que os da Data 1. Nas Figuras 4.13 e 4.14 também percebe-se a ineficiência do método para aproximar os valores da Data 5 aos da Data 1, nas bandas TM5 e TM7.

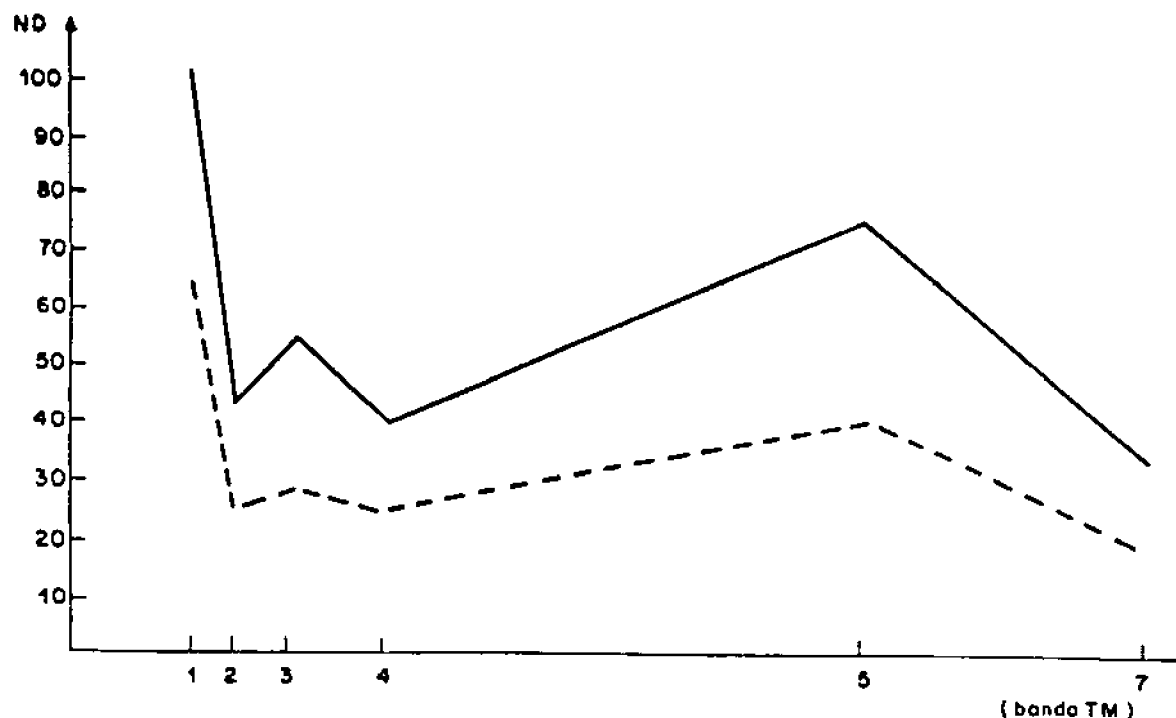


Fig. 4.12 - Números digitais para o Alvo 1 nas Datas 1 (---) e 5 (—).

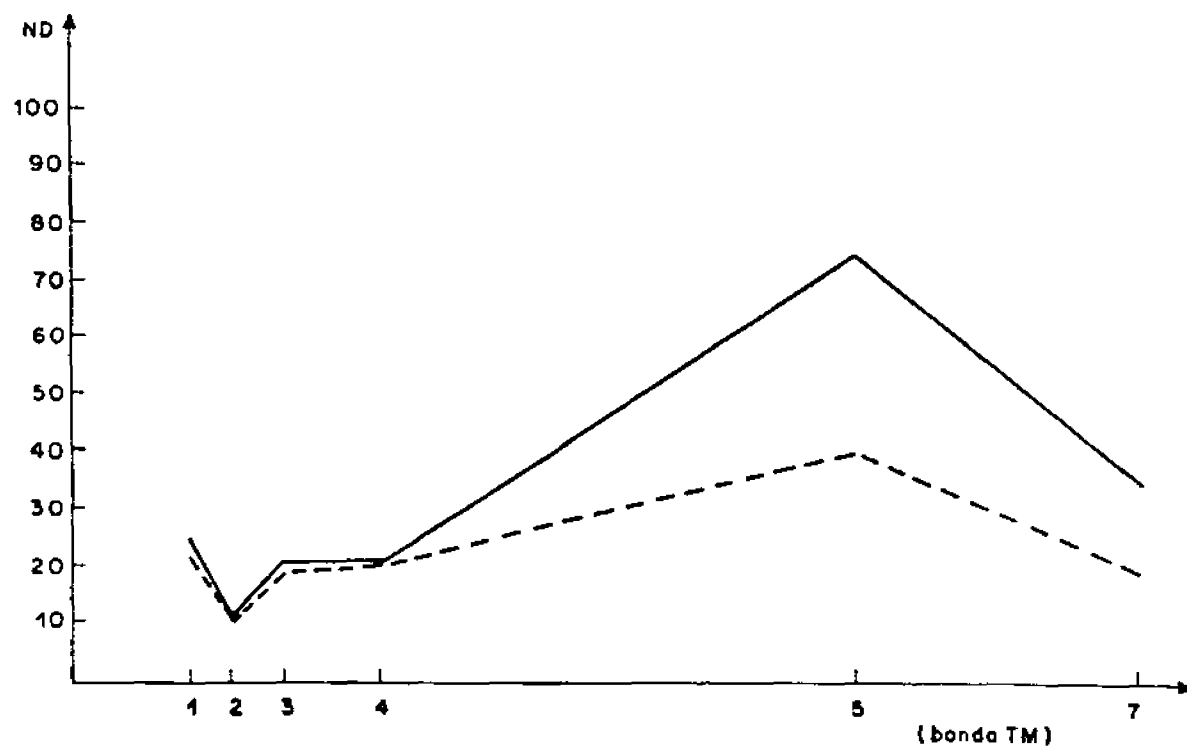


Fig. 4.13 - Números digitais corrigidos para o Alvo 1 nas Datas 1 (---) e 5 (—).

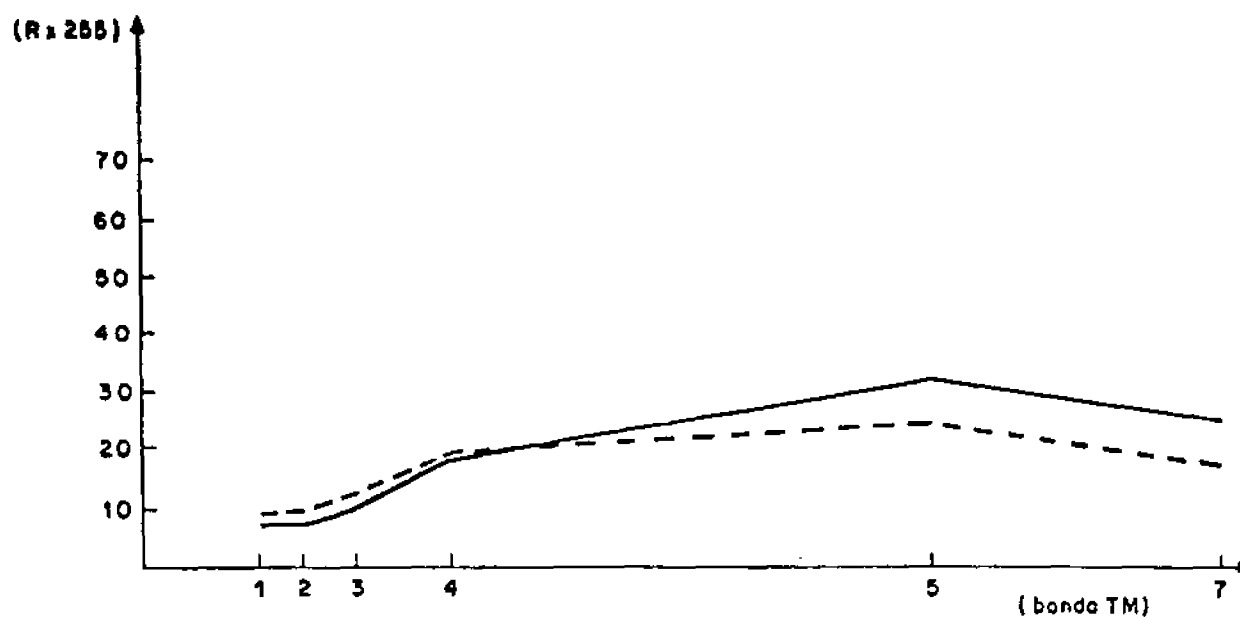


Fig. 4.14 - Reflectâncias corrigidas (R*255) para o Alvo 1 nas Datas 1 (---) e 5 (—).

O método proposto por Chavez deveria especificar as condições de iluminação válidas para as tabelas utilizadas na escolha dos modelos atmosféricos. Desta maneira, os números digitais seriam normalizados para as condições de iluminação especificadas, antes da escolha do modelo de espalhamento relativo utilizado na correção, o que evitaria erros como os detectados neste estudo.

Analisando-se os valores de reflectância corrigidos constatou-se um fato curioso. Nas bandas TM5 e TM7 a correção atmosférica provocou o aumento dos valores de reflectância, ou seja, as reflectâncias corrigidas são maiores do que as reflectâncias aparentes, como pode ser observado na Figura 4.15.

O aumento foi causado pelo uso dos números digitais 1 e 2 na correção dos efeitos atmosféricos nestas bandas. Estes valores, quando transformados para radiâncias, assumem valores negativos porque são menores que o "off-set" das bandas. A Figura 4.16 mostra a relação entre os números digitais e os valores de radiância que podem ser recuperados.

Os números digitais que forem inferiores aos "off-sets" das bandas tornam-se radiâncias negativas e ao serem subtraídas dos valores aparentes irão, ao invés de subtraírem-se, somarem-se a eles. A Tabela 4.3 apresenta os "off-sets" de cada banda do TM/Landsat-5.

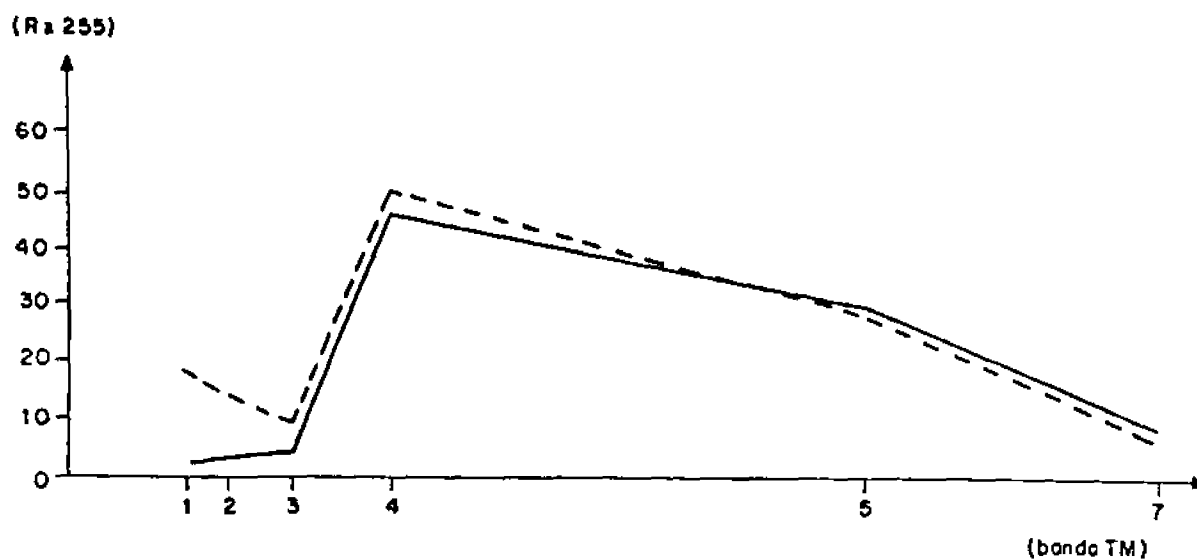


Fig. 4.15 - Reflectâncias aparentes (---) e reflectâncias corrigidas (—) ($R \cdot 255$) para o Alvo 4 na Data 1.

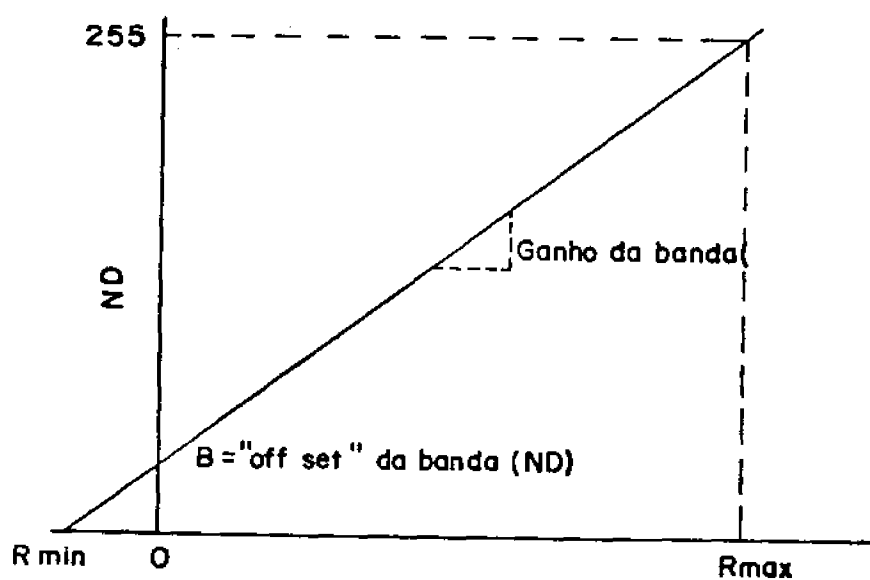


Fig. 4.16 - Relação genérica entre ND e radiâncias.
FONTE: NASA (1984).

TABELA 4.3

"OFF-SETS" EM ND PARA AS BANDAS TM/LANDSAT-5 APÓS 15/01/84.

BANDA	"OFF-SET"
TM1	2,50
TM2	2,30
TM3	1,50
TM4	1,84
TM5	3,42
TM6	-21,82
TM7	2,60

FONTE: NASA (1984).

Para exemplificar, a Tabela 4.4 mostra os valores de radiância para o número digital 1, nas diferentes bandas do TM. Percebe-se que ele assume valores distintos em cada banda espectral, mas sempre negativos.

TABELA 4.4

RADIÂNCIAS CORRESPONDENTES AO NÚMERO DIGITAL 1 NAS BANDAS
REFLETIDAS DO TM

BANDAS	RADIÂNCIAS em mW/cm ² .sr . μm
TM1	-0,089
TM2	-0,160
TM3	-0,039
TM4	-0,068
TM5	-0,026
TM7	-0,009

Apesar dos problemas detectados, o método de Chavez (1988) demonstrou ser mais prático, facilitando a amostragem dos valores para a correção, valores que correspondem a um modelo de espalhamento relativo real. Os números digitais estimados mantêm uma relação espectral correta, definida pelo modelo de espalhamento relativo.

Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 estão os gráficos plotados com os valores, respectivamente, da terceira, quarta e quinta coluna da Tabela 4.2 para cada data analisada. Comparando-se os gráficos das três figuras percebe-se que os valores estimados com o método de Chavez, para as quatro cenas com condições de iluminação semelhantes (Figura 4.17), são os que apresentam maior

concordância, com uma nítida forma exponencial. Os números digitais estimados para a correção dos valores aparentes da Data 5 apesar de serem mais altos, mantêm-se proporcionais aos valores estimados para a correção das cenas nas outras datas.

Os valores mínimos do histograma de cada banda (Figura 4.18) são os que apresentam as maiores variações, evidenciando seu caráter mais aleatório, não correspondendo a um modelo de espalhamento com relações espectrais definidas.

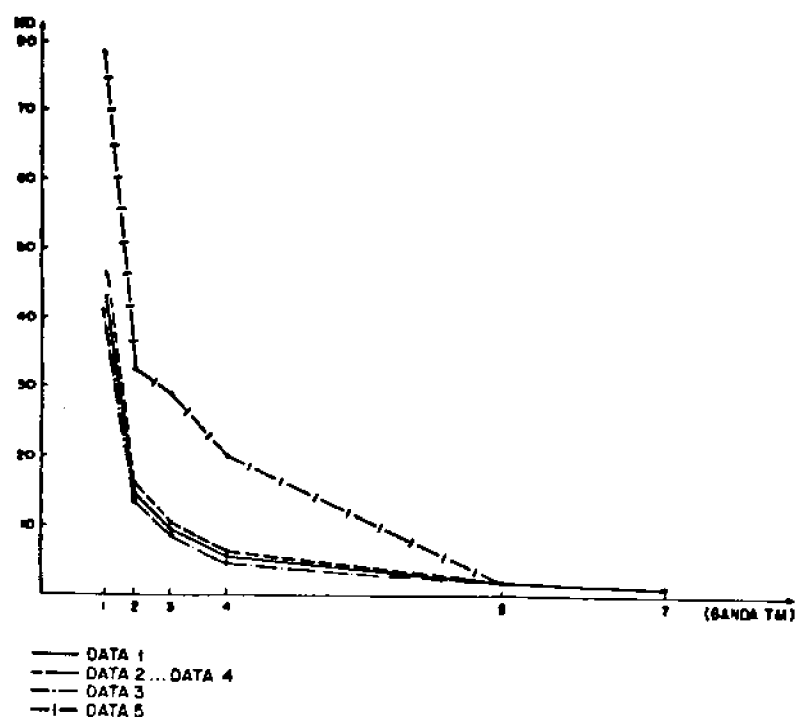


Fig. 4.17 - Números digitais estimados pelo método de Chavez para a correção atmosférica nas Datas 1, 2, 3, 4 e 5.

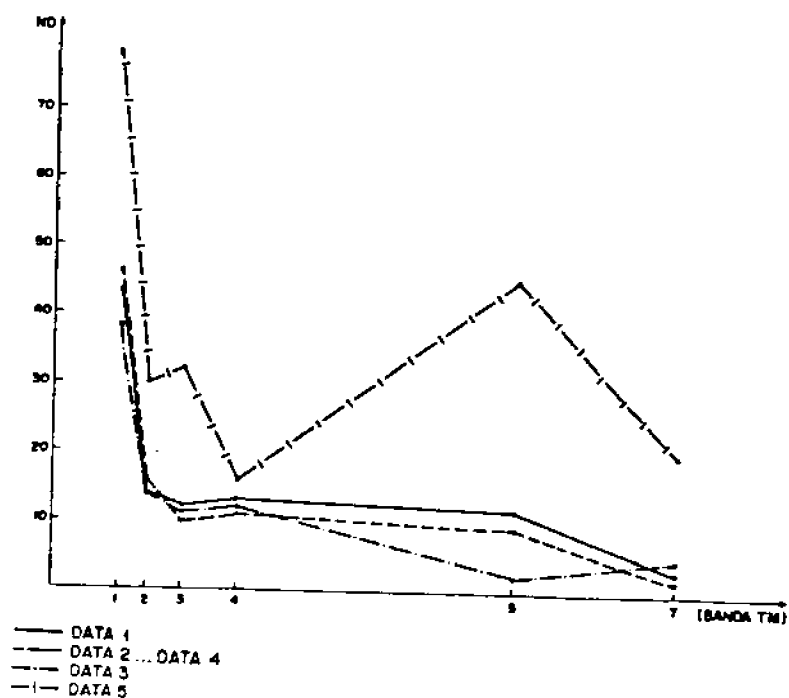


Fig. 4.18 - Números digitais mínimos dos histogramas de cada banda para as Datas 1, 2, 3, 4 e 5.

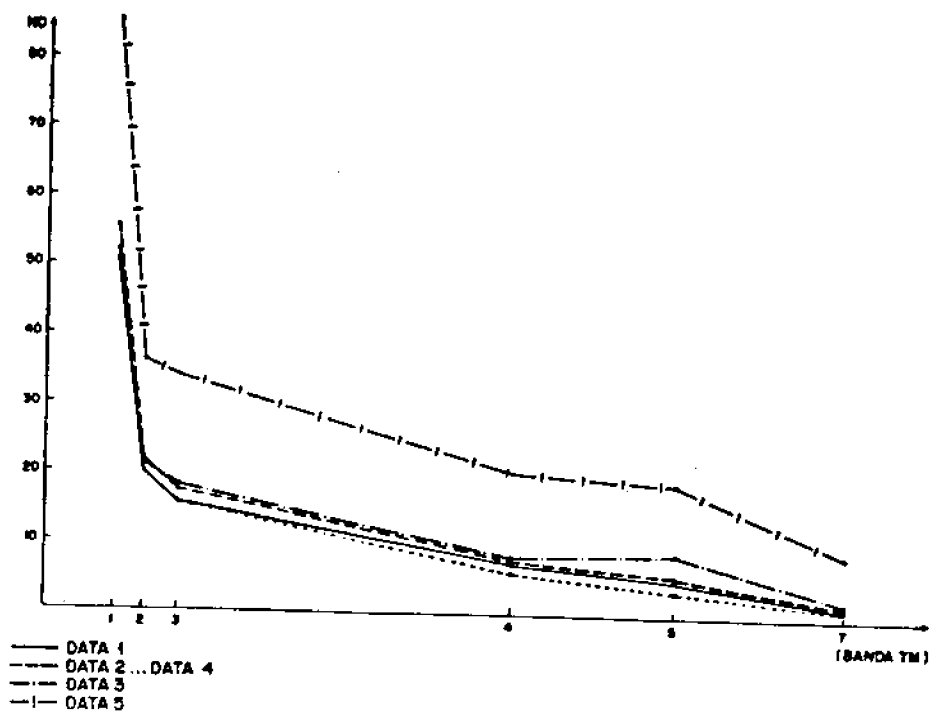


Fig. 4.19 - Números digitais do rio Corrente nas Datas 1, 2, 3, 4 e 5.

Já, os valores obtidos para o Rio Corrente (Figura 4.19) são razoavelmente homogêneos e apresentam forma aproximadamente exponencial ao longo do espectro, como os valores obtidos pelo método de Chavez (1988). Os números digitais da Data 5 são mais altos e proporcionais aos números digitais das outras datas.

Os problemas detectados no uso do método de Chavez para a correção de dados que forão transformados para radiâncias e reflectâncias, também ocorreriam se os números digitais para a correção fossem determinados no histograma de cada banda, ou sobre o Rio Corrente. Estes métodos também indicam valores abaixo dos "off-sets", na banda TM7, para a correção e os valores da Data 5, na maioria das vezes, são ainda maiores, o que ocasionaria uma supercorreção mais pronunciada.

4.3 - RESULTADOS DA ANÁLISE 1

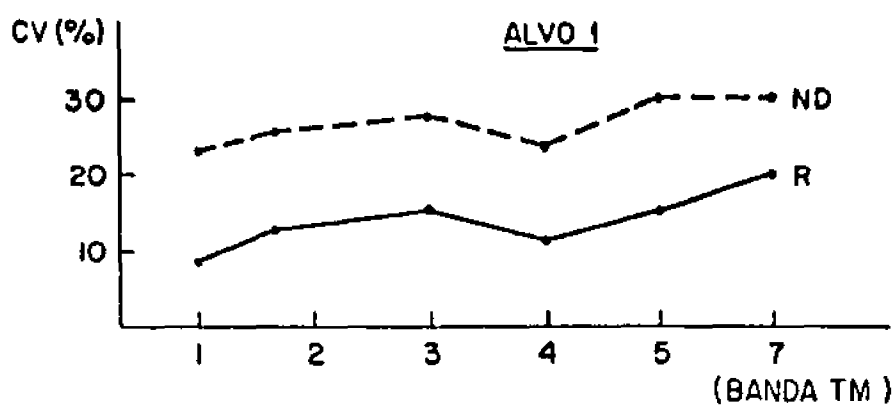
Os gráficos da Figura 4.20 apresentam os coeficientes de variação obtidos para os conjuntos de observações expressas pelos números digitais e pelas reflectâncias aparentes das Datas 1 e 5, constituindo um único conjunto, para cada alvo e banda.

A Figura 4.20 mostra que os coeficientes de variação para as observações expressas por reflectâncias aparentes são menores que os coeficientes de variação para as observações expressas pelos números digitais. Como o comportamento espectral dos alvos (principalmente os Alvos 1, 2 e 3) provavelmente manteve-se constante, estes resultados indicam que a transformação dos números digitais para valores de reflectância diminuiu a variabilidade do comportamento espectral de todos os alvos, da Data 1 para a Data 5, normalizando as condições de iluminação entre cenas. A única exceção é o Alvo 4 (vegetação) na banda TM4

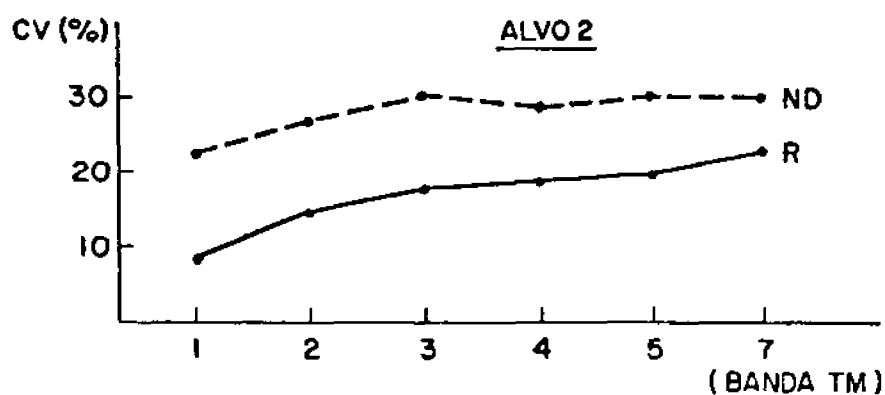
(Figura 4.20 d), ficando a reflectância corrigida com coeficientes de variação maiores que os números digitais.

A vegetação possui menor biomassa na Data 5 (outubro), estação de perda das folhas. Normalmente, esta menor biomassa provoca uma diminuição na reflectância da vegetação na banda TM4; no entanto o menor ângulo zenital solar desta data compensou o decréscimo na reflectância do alvo. Assim, os números digitais das duas datas ficaram praticamente iguais, como pode ser observado na Figura 4.21. Com a transformação foi compensada a diferença nas condições de iluminação, e as diferenças nas reflectâncias do alvo, nas duas datas, tornaram-se perceptíveis (Figura 4.3). O coeficiente de variação das reflectâncias é maior do que o dos números digitais, porque a transformação revelou o comportamento real do Alvo 4, que variou de maio a outubro, e estava mascarado quando expresso por números digitais.

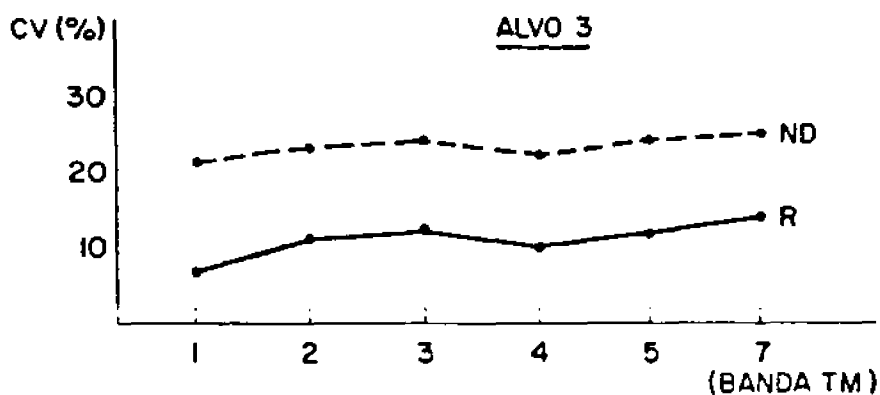
O gráfico da Figura 4.9a mostra como, na banda TM4, a vegetação é o único alvo que apresenta uma reflectância aparente menor na Data 5. Na medida em que os valores da banda TM4 são menores, os da banda TM3 são maiores. Nos gráficos da Figura 4.8 observa-se, na banda TM3, a maior reflectância (aparente e corrigida) do Alvo 4 na Data 5. Para as reflectâncias aparentes (Figura 4.8a), o Alvo 4 é o que apresenta o gradiente mais abrupto da Data 4 para a Data 5. No gráfico da Figura 4.8b, percebe-se que a reflectância corrigida do Alvo 4 é a única que não decai da Data 4 para a Data 5, após a correção atmosférica.



a)



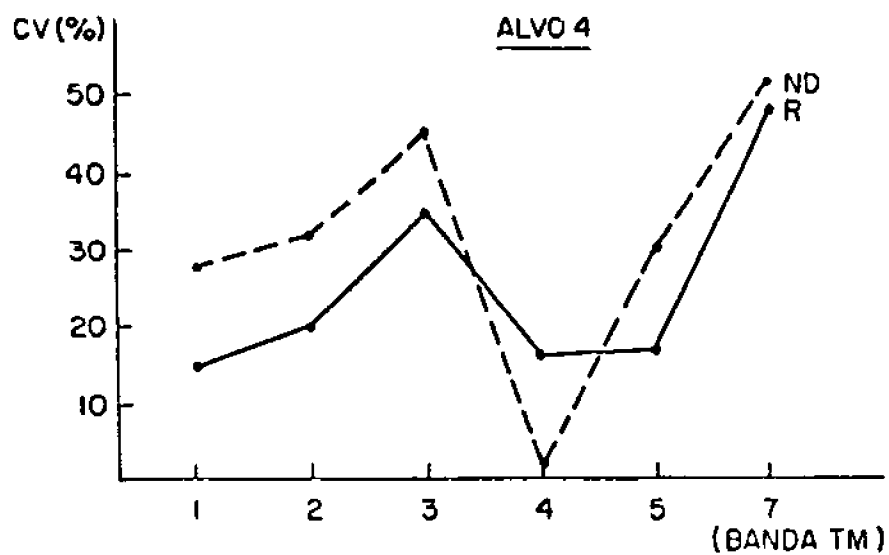
b)



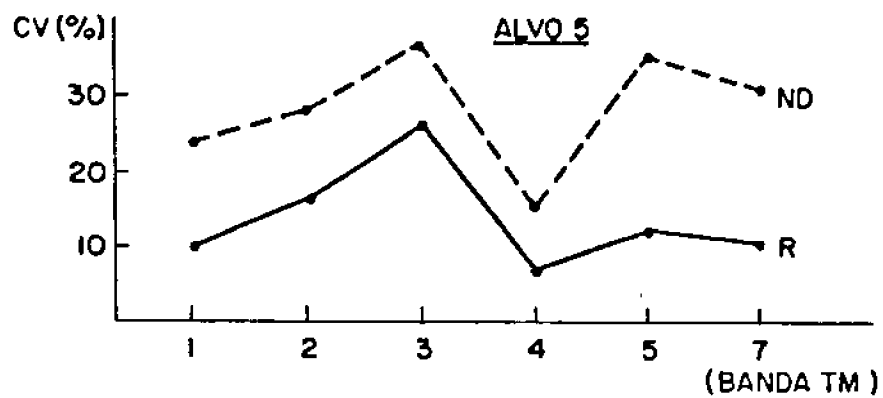
c)

Fig. 4.20 - Coeficientes de variação dos conjuntos de observações expressas por números digitais (ND) e por reflectâncias aparentes (R), para os Alvos 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).

(Continua)



d)



e)

Fig. 4.20 - Conclusão.

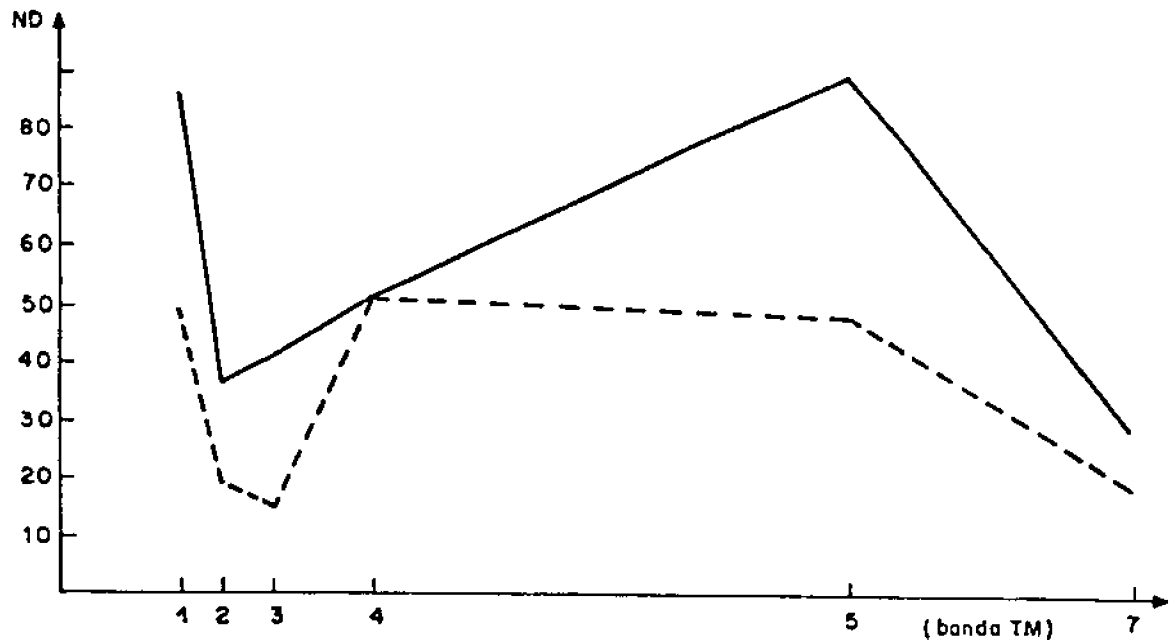


Fig. 4.21 - Números digitais para o Alvo 4 nas Datas 1 (---) e 5 (—).

Apesar da transformação ter diminuído a diferença entre o comportamento espectral de todos os alvos da Data 1 para a Data 5, não a eliminou. As reflectâncias da Data 5 continuam superiores em todas as bandas, como mostram os gráficos das Figuras 4.6a, 4.7a, 4.8a, 4.9a, 4.10a e 4.11a.

A Figura 4.12 mostra o comportamento do Alvo 1 nas Datas 1 e 5, expresso em números digitais, enquanto a Figura 4.22 mostra as reflectâncias aparentes ($R \cdot 255$ para não haver diferença de escala). É perceptível a redução da diferença entre os valores das Datas 1 e 5 com a transformação. Aqui, também fica evidente a persistência do maior valor das reflectâncias na Data 5, apesar da transformação.

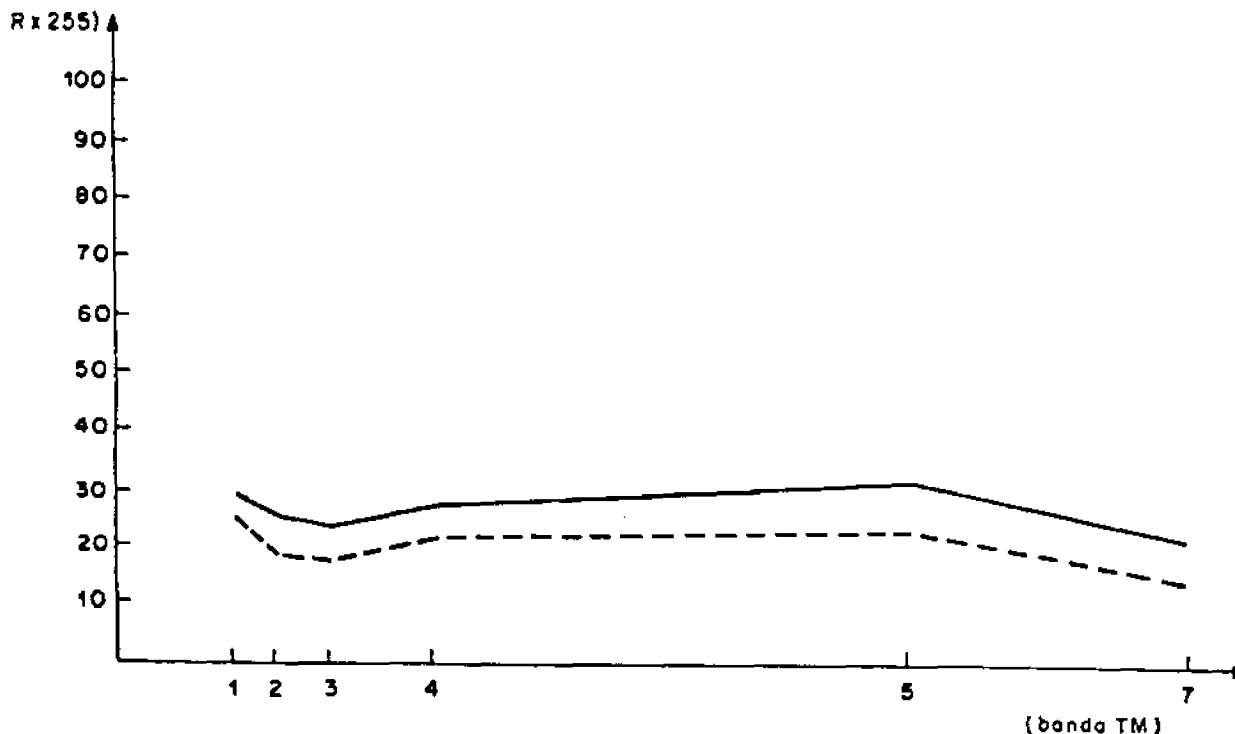


Fig. 4.22 - Reflectâncias aparentes ($R*255$) para o Alvo 1 nas Datas 1 (---) e 5 (—).

Na Figura 4.14 observa-se como a correção atmosférica aproximou os valores de reflectância das duas datas, nas bandas TM1, TM2, TM3 e TM4. É provável que a persistência de valores de reflectâncias aparentes mais elevados na Data 5 seja provocada, em parte, por efeitos atmosféricos. Em imagens obtidas com ângulos zenitais solares pequenos, os efeitos atmosféricos são mais intensos, principalmente a radiância da trajetória (Bowker et al., 1985).

A Tabela 4.5 mostra, em porcentagem, a redução provocada pela transformação, entre os valores médios das Datas 1, 2, 3 e 4 e os valores da Data 5, para os Alvos 1, 2 e 3 em cada banda espectral. As Bandas TM1 e TM5 foram as que apresentaram a maior redução na variabilidade do comportamento espectral dos alvos com a transformação.

O Alvo 2 foi o que apresentou as menores reduções de variabilidade em todas as bandas. Talvez, isto se deva ao fato deste alvo possuir um microrelevo mais acentuado (lâpies) do que os Alvos 1 e 3, o que o torna menos lambertiano.

TABELA 4.5

REDUÇÃO NA VARIABILIDADE (%) ENTRE OS VALORES DAS DATAS 1
2, 3 e 4 E OS VALORES DA DATA 5 APÓS A TRANSFORMAÇÃO

%	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
ALVOS						
1	12,99	4,40	6,25	3,78	9,53	2,89
2	11,96	3,95	4,90	2,90	6,89	2,27
3	13,05	4,89	6,20	4,50	10,68	4,20

4.4 - RESULTADOS DA ANÁLISE 2

As razões F_c , calculadas com as reflectâncias aparentes e com as reflectâncias corrigidas para cada alvo, em cada banda espectral, estão na Tabela 4.6. Realizou-se o teste tanto com os valores corrigidos, como com os valores aparentes. Os valores assinalados (*) são os que estão acima do F crítico, provocando a rejeição da hipótese nula - H_0 : o efeito temporal não é significativo. O valor do F crítico é 10,128, para 0,05 de significância. As condições de homocedasticidade exigidas para a análise de variância foram atendidas. As populações (reflectâncias aparentes e corrigidas de cada alvo e banda,

nas quatro datas) têm distribuição normal, variâncias iguais e são independentes.

TABELA 4.6

Fc CALCULADOS COM AS REFLECTÂNCIAS APARENTES (Ra)
E REFLECTÂNCIAS CORRIGIDAS (Rc) PARA CADA ALVO
E BANDA TM

BANDA	ALVO	Fc (Ra)	Fc (Rc)
TM1	1	15,15*	20,73*
	2	10,85*	10,93*
	3	13,94*	10,92*
	4	124,33*	102,56*
	5	10,55*	99,87*
TM2	1	8,20	6,40
	2	3,71	5,10
	3	4,45	2,80
	4	24,29*	34,88*
	5	0,49	16,10*
TM3	1	8,70	5,12
	2	1,95	2,93
	3	6,40	2,80
	4	12,15*	10,18*
	5	12,21*	26,72*
TM4	1	9,83	8,93
	2	0,81	0,89
	3	8,17	5,73
	4	230,78*	198,62*
	5	9,35	17,22*
TM5	1	2,90	2,82
	2	0,47	0,44
	3	0,35	6,38
	4	25,25*	25,40*
	5	5,20	49,00*
TM7	1	6,10	6,64
	2	3,12	2,14
	3	2,03	2,05
	4	305,70*	295,25*
	5	2,13	2,12

Para os Alvos 1, 2 e 3 (litologias) aceita-se a hipótese nula em todas as bandas, exceto a TM1. Nesta banda a hipótese nula é rejeitada para todos os alvos, tanto com os valores de reflectâncias aparentes, quanto com os de reflectâncias corrigidas.

A rejeição da hipótese nula na banda TM1 evidencia que, nesta banda, a variabilidade entre-cenas, das reflectâncias aparentes e corrigidas de todos os alvos, foi maior do que a variabilidade intra-cena. Esta variabilidade pode ter sido causada por variações nas condições atmosféricas que não foram compensados com a aplicação da correção atmosférica, já que esta banda é a mais afetada pelos efeitos atmosféricos; ou pode ter sido causada por algum desajuste do sistema sensor.

É difícil assegurar qual destes fatores é o responsável pela maior variabilidade das reflectâncias nesta banda. No entanto, o caráter aleatório da variabilidade, que pode ser observado nas Figuras 4.6a e b (R_a e R_c), normalmente, é provocada por variações ambientais (Duggin, 1985). Geralmente, desajustes de sistemas sensores produzem efeitos sistemáticos que causam a redução na sensibilidade do sistema com o tempo (Slater et al., 1987).

Para o Alvo 4 a hipótese nula é rejeitada em todas as bandas, tanto para os valores de reflectâncias aparentes como para as reflectâncias corrigidas. Para o Alvo 5 também rejeita-se a hipótese nula na maioria das bandas. Ela é aceita quando as observações são expressas em reflectâncias aparentes nas bandas TM2, TM4 e TM5 e na banda TM7, tanto para as reflectâncias aparentes, como para as corrigidas. Estes resultados estão dentro do esperado para os Alvos 4 e 5, visto que eles foram apontados como os mais instáveis na análise da Seção 4.1.

Os resultados desta análise evidenciam a estabilidade radiométrica, quando em órbita, do sensor TM/Landsat-5, no período de observações que este estudo abrange (maio 1984 a maio de 1987). Apesar dos problemas com o calibrador interno, apontados por Singh (1985); do decaimento na sensibilidade dos filtros, detectores e componentes eletrônicos, além da perda de transmitância do telescópio, divulgados por Slater et al. (1987), os dados analisados neste estudo não apresentam variações significativas que fossem causadas por estes efeitos.

Existem dois fatos que podem justificar a não detecção destes efeitos:

- 1) Como já foi mencionado na Seção 2.2.1.3 do Capítulo 2, as fitas CCTs TM/Landsat-5 geradas em Cachoeira Paulista são calibradas com valores pré-lançamento. Os problemas com o calibrador interno, realmente, não estariam afetando os dados distribuídos no Brasil, pois os valores fornecidos por ele não são utilizados.
- 2) Slater et al. (1987) detectaram uma redução na sensibilidade em órbita comparada com a pré-lançamento. O autor não monitorou o funcionamento do TM/Landsat-5, nos anos subsequentes ao seu lançamento, como se fez neste estudo.

Os resultados desta análise indicam que o TM, mesmo que tenha sofrido uma redução na sensibilidade com o lançamento, não tem apresentado variações significativas nas suas características radiométricas quando em órbita.

4.5 - RESULTADOS DA ANÁLISE 3

Nos gráficos das Figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27 têm-se os números digitais, números digitais corrigidos para os efeitos atmosféricos, reflectâncias aparentes e reflectâncias corrigidas de todos os alvos na imagem da Data 1. Nestas figuras observa-se a discordância entre os comportamentos espectrais dos alvos expressos por estas grandezas.

De maneira geral, as maiores diferenças estão nos gradientes dos espectros entre as bandas do visível e infravermelho-próximo (TM1, TM2, TM3 e TM4). Nas bandas TM5 e TM7 os espectros também diferem, mas a discordância é menor.

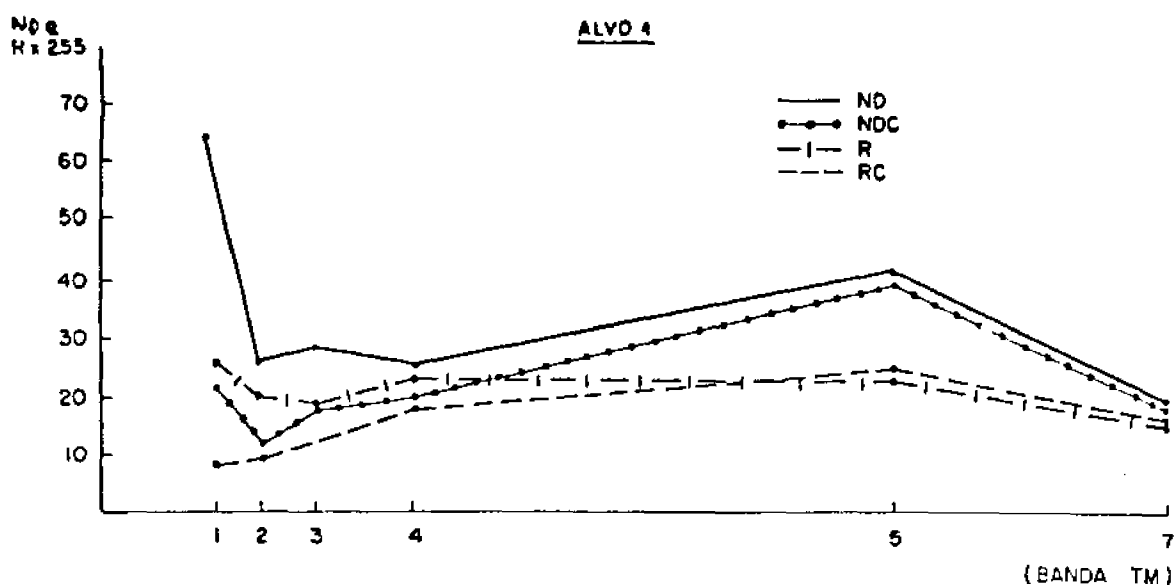


Fig. 4.23 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 1.

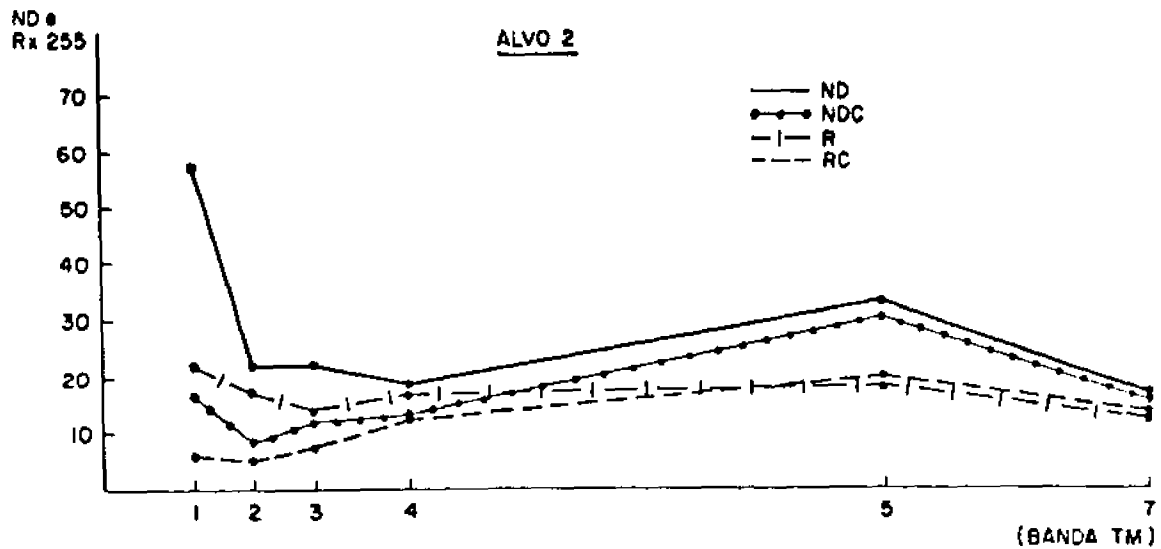


Fig. 4.24 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 2.

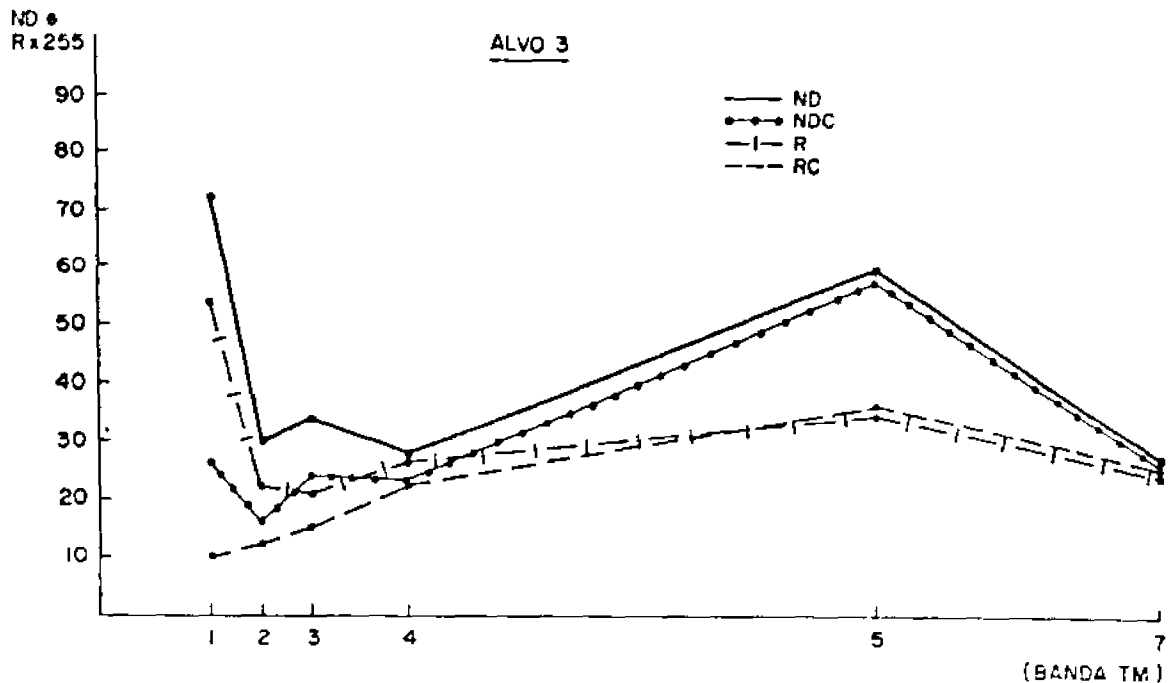


Fig. 4.25 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 3.

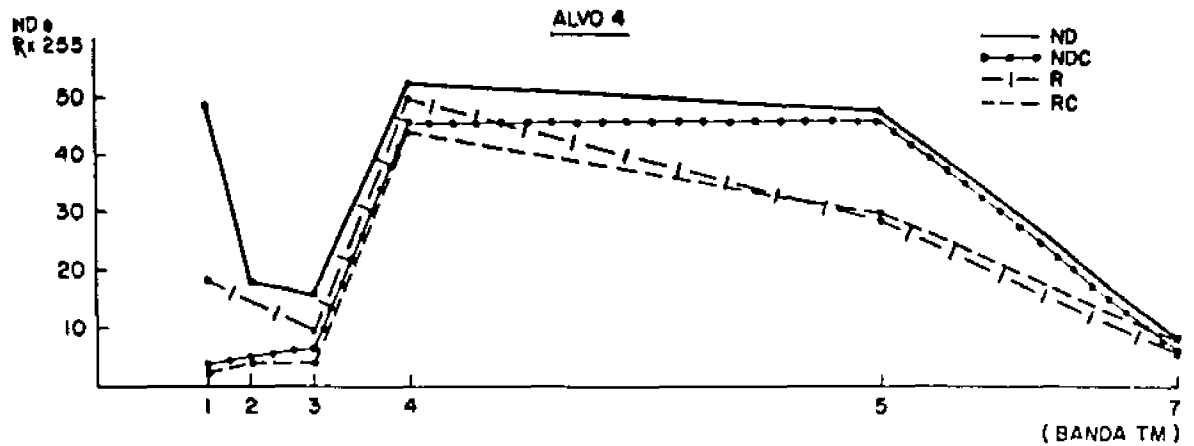


Fig. 4.26 - Números digitais (ND), número digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 4.

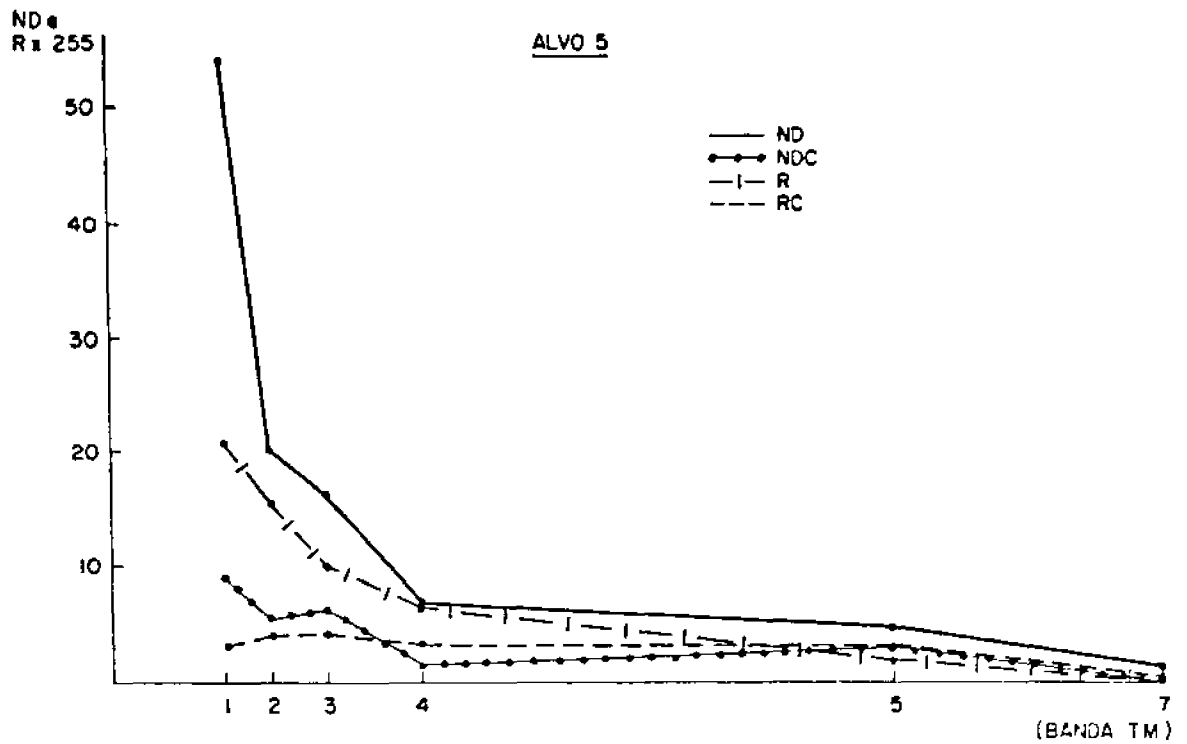


Fig. 4.27 - Números digitais (ND), números digitais corrigidos (NDC), reflectâncias aparentes (R) e reflectâncias corrigidas (RC) nas bandas TM, para o Alvo 5.

Para os Alvos 1, 2 e 3 (Figura 4.23, 4.24 e 4.25), os números digitais das bandas TM1 e TM3 são maiores do que os das bandas TM2 e TM4. Já, os números digitais corrigidos são maiores na banda TM1 do que na banda TM2, crescendo nas bandas TM3 e TM4. Por sua vez, as reflectâncias das bandas TM1 e TM4 são maiores do que as das bandas TM2 e TM3, enquanto as reflectâncias corrigidas da banda TM1 são menores do que a das bandas TM2, TM3 e TM4 respectivamente. Da banda TM4 para a TM5, todos os valores crescem, decrescendo em seguida no sentido da banda TM7. Nesta região do espectro eletromagnético, os valores aparentes e corrigidos são semelhantes, sendo que as maiores diferenças estão entre os gradientes dos espectros dos números digitais e reflectâncias.

Pela análise dos valores do Alvo 4 (Figura 4.26) percebe-se que os números digitais, apresentam valores maiores nas bandas TM1, TM4 e TM5 e menores nas bandas TM2, TM3 e TM7. Já os números digitais corrigidos apresentam valores que crescem da banda TM1 à TM5 e decrescem na banda TM7. As reflectâncias aparentes decrescem da banda TM1 à TM3 apresentando valores mais altos na banda TM4, que voltam a decrescer até a banda TM7. As reflectâncias corrigidas, por sua vez, apresentam valores que crescem da banda TM1 à banda TM4, apresentando uma concordância perfeita (magnitude e gradientes) com os números digitais corrigidos. Nas bandas TM5 e TM7, tanto os números digitais como as reflectâncias decrescem, sendo que os gradientes do espectro são diferentes.

O Alvo 5 apresenta números digitais, números digitais corrigidos e reflectâncias aparentes decrescentes da banda TM1 à banda TM4 (Figura 4.27), formando espectros com gradientes distintos. Enquanto isto, as reflectâncias corrigidas da banda TM1 são menores do que as da banda TM2 e continuam decrescendo nas bandas TM3 e TM4.

Essa discrepância entre os valores de números digitais e reflectâncias, corrigidos ou não, é determinada pelos parâmetros de calibração do sensor - ganho, "off-set" e E_{sol} - que variam de banda a banda. Entre os números digitais e as radiâncias, a relação é dada pelos ganhos e "off-sets" de cada banda espectral. A Figura 4.28 mostra esta relação.

Entre os números digitais e reflectâncias, além dos ganhos e "off-sets", também interfere a irradiância solar de cada banda. A irradiância solar varia conforme a longitude e a latitude da área de estudo e a data e horário da aquisição da cena. Assim, um mesmo número digital corresponde a diversos valores de reflectância, dependendo da banda espectral, localização geográfica da área de estudo e do momento de aquisição da cena. A Figura 4.29 mostra os valores de reflectância que um mesmo número digital (80) assume, ao longo do espectro, para duas cenas hipotéticas adquiridas com ângulos zenitais solares 50° e 33° .

Nota-se que para um mesmo número digital quanto menor o ângulo zenital solar, menor o valor de reflectância que ele assume. Isto é lógico, pois para um alvo ter números digitais elevados, em imagens com ângulos zenitais solares grandes, tem que possuir uma reflectância maior do que a de outros alvos com os mesmos números digitais, em cenas com ângulos zenitais solares pequenos.

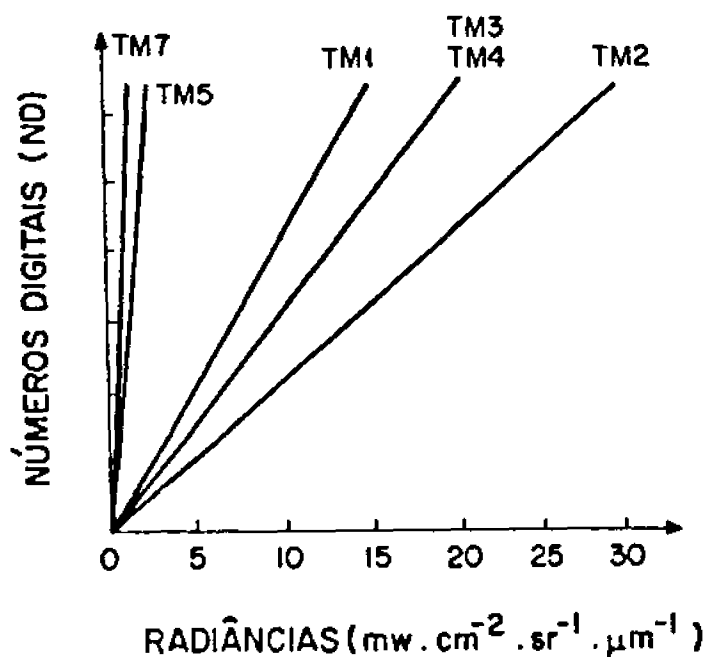


Fig. 4.28 - Relação entre a radiância no detector e o número digital para as bandas TM/Landsat-5 e processadas após 15/01/84.

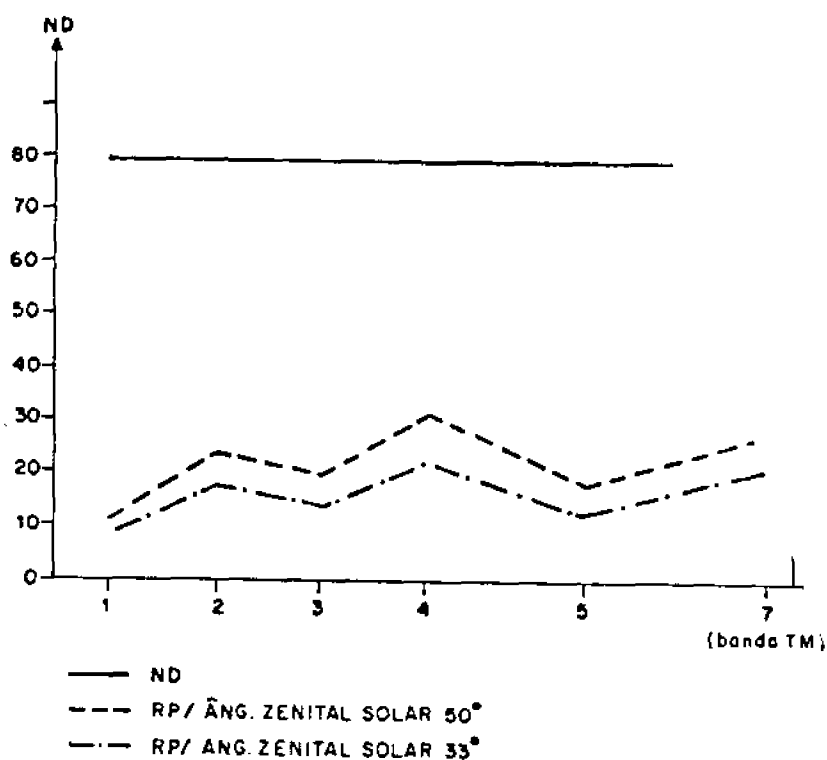


Fig. 4.29 - Reflectâncias para os ângulos zenitais solares 50° e 33° que o número digital 100 assume nas bandas TM/Landsat-5.

A discordância entre números digitais, radiâncias e reflectâncias traz problemas a vários procedimentos de análise de dados de sensoriamento remoto, tais como:

- a diferença entre o gradiente dos espectros dos números digitais e reflectâncias gera erros na interpretação de razões entre bandas;
- a falta de correspondência entre o comportamento, nas imagens, das reflectâncias e números digitais, invalida a utilização destes últimos na inferência do comportamento espectral de alvos, a partir de dados de imagens, bem como a sua comparação com espectros levantados em campo e laboratório;
- em análises quantitativas, modelos e resultados obtidos com dados expressos por números digitais têm a sua validade e aplicação restrita a cenas que tenham sido obtidas pelo mesmo sensor, com a mesma calibração, e possuam a mesma geometria de iluminação da cena utilizada na sua obtenção; além dos problemas introduzidos por variações atmosféricas.

Os gráficos das Figuras 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34 mostram como as reflectâncias corrigidas apresentam a melhor concordância com os valores de reflectância determinados em trabalhos anteriores de campo. Aqui, a correção atmosférica foi imprescindível para aproximar os valores de reflectância das imagens, dos valores medidos em campo.

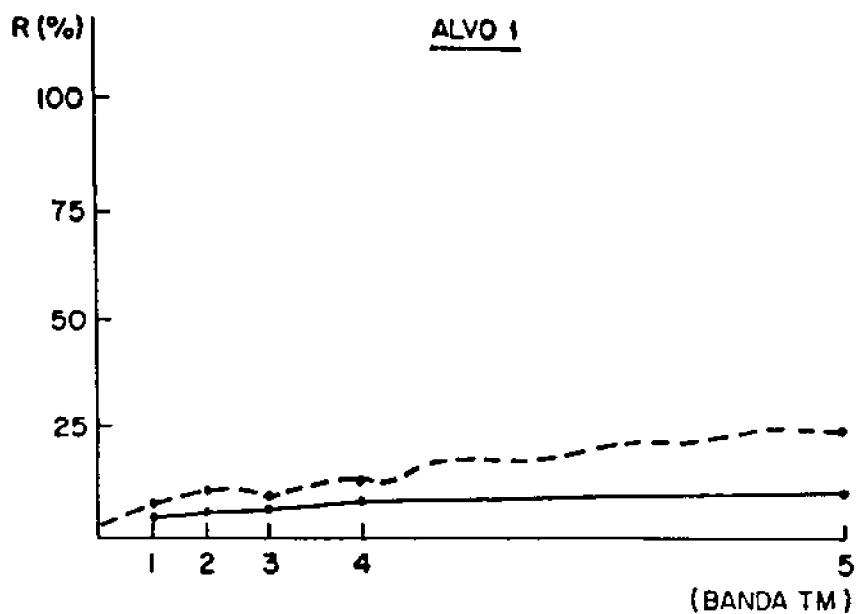


Fig. 4.30 - Comportamento espectral do Alvo 1 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens (—) e pelo espectro determinado em campo (---).

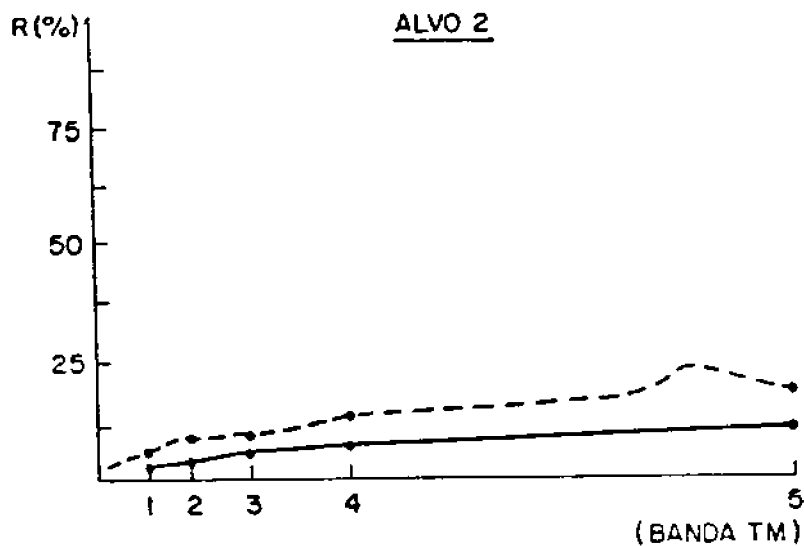


Fig. 4.31 - Comportamento espectral do Alvo 2 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens (—) e pelo espectro determinado em campo (---).

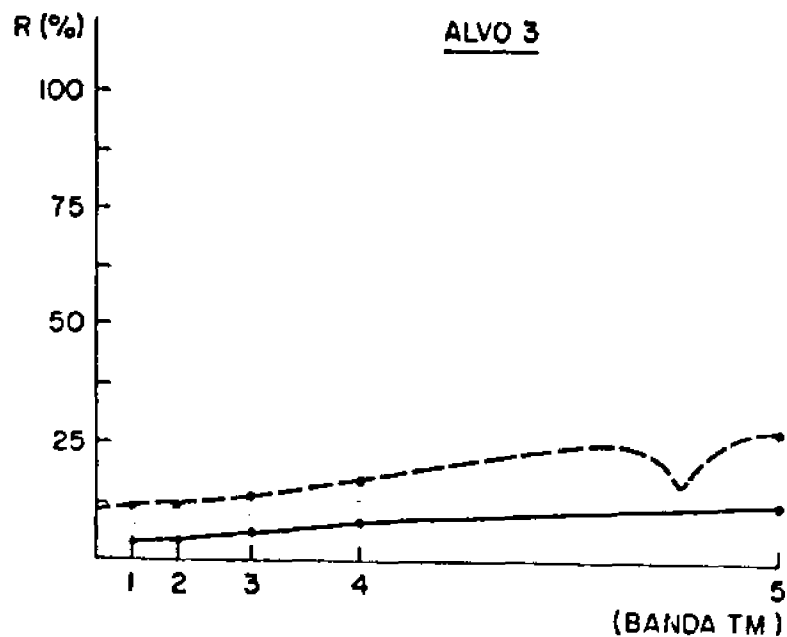


Fig. 4.32 - Comportamento espectral do Alvo 3 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens (—) e pelo espectro determinado em campo (---).

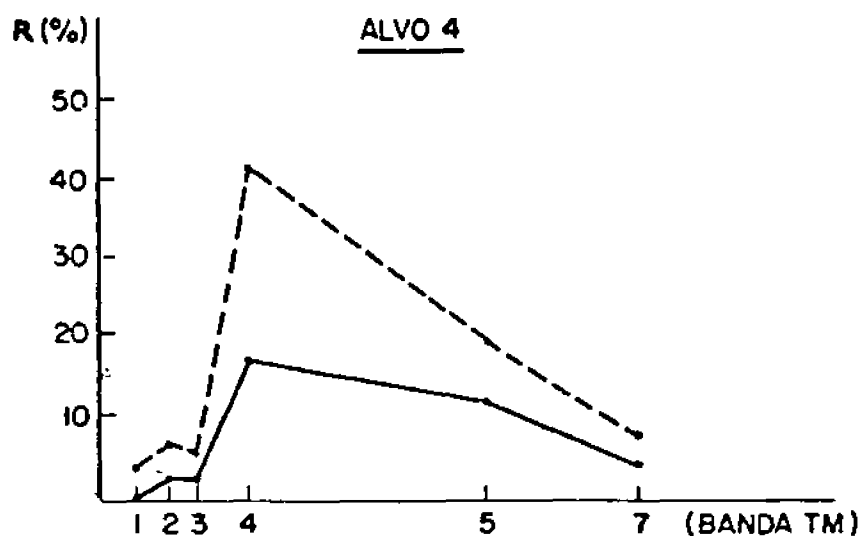


Fig. 4.33 - Comportamento espectral do Alvo 4 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens (—) e pelo espectro do cerrado (---).

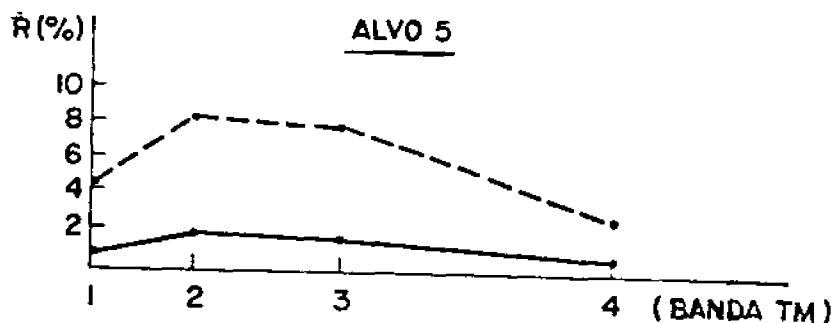


Fig. 4.34 - Comportamento espectral do Alvo 5 expresso por reflectâncias corrigidas das imagens (—) e pelo espectro de águas fluviais turbidas (---).

Os espectros obtidos nas imagens apresentam feições semelhantes aos obtidos anteriormente. Entretanto, os valores de reflectância das imagens são menores do que os outros, em todas as bandas e para todos os alvos. Por exemplo, para os Alvos 1, 2 e 3, cujos espectros de campo foram determinados com o mesmo instrumento, as reflectâncias corrigidas das imagens são menores - 4% na banda TM1, 6% na banda TM2, 7,6% na banda TM3, 9,3% na banda TM4 e 10,6% na banda TM5 - do que os valores dos espectros de campo. Para os três alvos (1, 2 e 3) detectou-se um aumento da diferença, entre as reflectâncias das imagens e as reflectâncias de campo, no sentido dos comprimentos de onda maiores.

Para o Alvo 4 (vegetação), as reflectâncias das imagens são - 2,75% na banda TM1, 5,17% na banda TM2, 3% na banda TM3, 25% na banda TM4, 18% na banda TM5 e 5,7% na banda TM7 - menores do que os valores do espectro utilizado como referência. Aqui a diferença entre as reflectâncias não aumentou para as bandas de menor energia, principalmente nas bandas TM4 e TM5. O aumento na diferença detectada para os outros alvos deve estar relacionada ao método de obtenção dos espectros de campo dos Alvos 1, 2 e 3.

Esta diferença entre as reflectâncias obtidas nas imagens e as reflectâncias dos espectros levantados em campo pode ter várias causas. Entre elas as mais prováveis são:

- a diferença entre o IFOV dos equipamentos utilizados em levantamentos espectralradiométricos de campo e o IFOV do satélite. O IFOV utilizado no campo, por abranger uma área menor, faz com que as superfícies aparentem uma granulometria menor, o que torna valores de reflectância medidos maiores. Além disto, os valores de reflectância de campo têm uma contribuição menor das adjacências ao alvo;
- a redução da transmitância do telescópio e da sensibilidade dos filtros, detectores e sistema eletrônico associado, sofrida pelo TM com o lançamento, detectada por Slater et al. (1987); e
- a falta de ajuste dos ganhos e "off-sets" da "Look up table", utilizada no pré-processamento de imagens no Brasil, para compensar estes problemas.

Também, não se podem desconsiderar os problemas causados pela atmosfera, ou ainda, pelos

espectros de referência adotados como padrão na comparação. Entretanto, acredita-se que se o problema fosse a atmosfera, as maiores diferenças seriam detectadas nas bandas de menor comprimento de onda. Quanto aos possíveis problemas com os espectros de referência, é muito difícil que todos os espectros utilizados na comparação tenham valores de reflectância superestimados.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A correção atmosférica aplicada conforme o método de Chavez (1988) normalizou os efeitos atmosféricos entre as cenas, diminuindo a variabilidade no comportamento espectral dos alvos, devida a este efeito. A correção aproximou os valores de reflectância de alvos estáveis e salientou ou revelou variações no comportamento espectral de alvos que provavelmente sofreram mudanças espectrais entre cenas. O método apresenta melhor desempenho na normalização dos efeitos atmosféricos nas bandas do visível e infravermelho-próximo (TM1, TM2, TM3 e TM4), do que nas bandas do infravermelho-médio (TM5 e TM7).

Detectaram-se alguns problemas na aplicação do método para a correção de dados que são transformados para reflectâncias e radiâncias. Na correção de cenas obtidas com diferentes condições de iluminação, o método iguala os números digitais das cenas, normalizando os efeitos atmosféricos e as condições de iluminação indiscriminadamente. Isto ocorre porque baseado em um número digital inicial alto ou baixo, devido às condições de iluminação, escolhe-se um modelo atmosférico inadequado à correção, mais dependente das condições de iluminação do que da turbidez atmosférica. Quando os números digitais corrigidos são transformados para reflectâncias, as condições de iluminação são compensadas, e o erro na correção atmosférica aparece na forma de uma super ou sub-correção.

O método proposto por Chavez deveria especificar as condições de iluminação válidas para as tabelas utilizadas na escolha dos modelos atmosféricos. Desta maneira, os números digitais iniciais poderiam ser

normalizados para as condições de iluminação especificadas, antes da escolha do modelo de correção.

As reflectâncias corrigidas nas bandas TM5 e TM7 ficaram maiores do que as reflectâncias aparentes. Isto ocorre porque os números digitais indicados pelo método para a correção das bandas TM5 e TM7, são inferiores aos "off-sets" da maioria das bandas. Quando transformados para radiâncias assumem valores negativos. Estas radiâncias negativas ao serem subtraídas dos valores aparentes irão, ao invés de subtraírem-se, somarem-se a eles.

Os problemas, detectados no uso do método de Chavez para a correção de dados que serão transformados para radiâncias e reflectâncias, também ocorreriam se os números digitais para a correção fossem determinados no histograma de cada banda, ou sobre o Rio Corrente.

De maneira geral, o método proposto por Chavez (1988) demonstrou ser mais prático do que outros métodos convencionais de determinação de números digitais mínimos para a correção atmosférica (amostragem de números digitais no histograma de cada banda, ou sobre corpos d'água), menos susceptíveis a erros de amostragem. Comparando-se os valores de correção fornecidos pelos diferentes métodos, os valores obtidos pelo método de Chavez foram os mais consistentes (coerentes), correspondendo a um modelo de espalhamento real onde as relações espectrais dos valores de correção das diferentes bandas são respeitadas.

A transformação dos números digitais para reflectâncias aparentes minimizou a variabilidade provocada por diferentes condições de iluminação no comportamento espectral dos alvos. Após a transformação, diminuiu a

variabilidade de alvos estáveis e foram reveladas mudanças em alvos que realmente variaram de uma data para a outra.

Os efeitos provocados pelas diferentes condições de iluminação foram reduzidos com a transformação, mas não foram eliminados. Os valores de reflectância da imagem obtida com o ângulo zenital solar menor (Data 5) permaneceram mais altos.

Em parte, a persistência de valores de reflectância mais elevados na Data 5 é causada por efeitos atmosféricos que variam inversamente ao ângulo zenital solar. Após a correção atmosférica das reflectâncias aparentes, a diferença entre os valores das duas cenas diminuiu.

Ficou evidente o interrelacionamento dos efeitos de geometria de iluminação e os efeitos atmosféricos, bem como a necessidade da correção destes últimos para melhorar os resultados obtidos com a transformação dos números digitais para reflectâncias.

Os resultados demonstraram que o sensor TM/Landsat-5 não apresentou variações significativas nas suas respostas, de maio de 1984 a maio de 1987, evidenciando a estabilidade das características radiométricas deste sensor, quando em órbita.

As imagens TM/Landsat-5 pré-processadas e distribuídas no Brasil não estão sujeitas a variações devidas a desajustes do sistema sensor.

Os valores de números digitais e reflectâncias, aparentes e corrigidos, apresentam comportamentos distintos ao longo do espectro. De maneira geral, as maiores diferenças estão nos gradientes dos

espectros entre bandas do visível e infravermelho-próximo (TM1, TM2, TM3 e TM4). Nas bandas TM5 e TM7 os espectros também diferem, mas a discordância é menor.

A discordância entre números digitais, radiâncias e reflectâncias traz problemas a vários procedimentos de análise de dados de sensoriamento remoto, tais como: interpretações de razões entre bandas; identificação de alvos nas imagens, a partir de informações espectrais obtidas em campo e laboratório; extensão de assinaturas espectrais e detecção de mudanças entre cenas obtidas com condições de iluminação diversas e modelos e resultados, obtidos com dados expressos por números digitais, têm sua validade restrita a cenas obtidas com as mesmas condições ambientais e pelo mesmo sensor.

Os espectros formados pelas reflectâncias corrigidas apresentam feições que mais concordam com os valores de reflectância obtidos em levantamentos espectrorradiométricos de campo.

Apesar de concordarem em feições com os espectros de campo, os valores das imagens assumem valores 4 a 10% menores do que as reflectâncias de campo e laboratório, para todos os alvos.

Os valores mais baixos das reflectâncias das imagens podem ter sido causados pela diferença entre o IFOV utilizado em levantamentos espectrorradiométricos de campo e o IFOV do satélite ou pelo uso de uma "Look up Table" inadequada no pré-processamento das imagens, que não esteja considerando alguma perda de sensibilidade que o sensor tenha sofrido com o lançamento do satélite. Também não se pode descartar os problemas relacionados com a correção atmosférica aplicada e/ou com os espectros utilizados na comparação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AHERN, F.J.; TEILLET, P.M.; GOODENOUGH, D.G.

Transformations of atmospheric and solar illumination conditions on the CCRS Image Analysis System. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 5., West Lafayette, IN, June 27-29, 1979. **Proceedings.** New York, NY, IEEE, 1979, p. 34-51.

AHERN, F.J.; GOODENOUGH, D.G.; JAIN, S.C.; RAO, U.R. Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 11., Ann Arbor, MI, 1977. **Proceedings.** Ann Arbor, MI, ERIM, 1977, p. 731-754.

ALMANAQUE NÁUTICO PARA 1984. Rio de Janeiro, Ministério da Marinha. DHN, 1983.

——— 1985. Rio de Janeiro, Ministério da Marinha. DHN, 1984.

——— 1986. Rio de Janeiro, Ministério da Marinha. DHN, 1985.

——— 1987. Rio de Janeiro, Ministério da Marinha. DHN, 1986.

BARKER, J.L.; BALL, D.L.; LEUNG, K.C.; WALKER, J.A. Pre-launch absolute radiometric calibration of Landsat-4 protoflight Thematic Mapper. In: LANDSAT-4 SCIENTIFIC CHARACTERIZATION EARLY RESULTS SYMPOSIUM, Greenbelt, MD, Goddard Space Flight Center, Feb. 22-24, 1983. **Proceedings.** Greenbelt, MD, GSFC, 1985a, v. 2, p. 277-371. (NASA CP-2355).

- BARKER, J.L.; ABRAMS, R.B.; BALL, D.L.; LEUNG, K.C.
Radiometric calibration and processing procedure for
reflective bands on Landsat-4 protoflight thematic
mapper. In: LANDSAT-4 SCIENTIFIC CHARACTERIZATION EARLY
RESULTS SYMPOSIUM, Greenbelt, MD, Goddard Space Flight
Center, Feb. 22-24, 1983. **Proceedings.** Greenbelt, MD,
GSFC, 1985b, v. 2, p. 47-86. (NASA CP-2355).
- BARKER, J.L. Relative radiometric calibration of Landsat
TM reflective bands. In: LANDSAT-4 SCIENTIFIC
CHARACTERIZATION EARLY RESULTS SYMPOSIUM, Greenbelt, MD,
Goddard Space Flight Center, Feb. 22-24, 1983.
Proceedings. Greenbelt, MD, GSFC, 1985, v. 3, p. 1-220.
(NASA CP-2355).
- BERNSTEIN, R.; LOTSPIECH, J.B. Analysis and evaluation of
the landsat-4 MSS and TM sensor and ground data
processing systems - early results. In: LANDSAT-4
SCIENTIFIC CHARACTERIZATION EARLY RESULTS SYMPOSIUM,
Greenbelt, MD Goddard Space Flight Center, Feb. 22-24,
1983. **Proceedings.** Greenbelt, MD, GSFC, 1985, v. 4, p.
25-90. (NASA CP-2355).
- BIGGAR, S.F.; BRUGGE, C.J.; CAPRON, B.A.; CASTLE, K.R.;
DINGUIRARD, M.C.; HOLM, R.G.; LINGG, L.J.; MAO, Y.;
PHILLIPS, A.L.; SLATER, P.N.; WIEMAN, S.L.; YUAN, B.
Absolute calibration of remote sensing instruments. In:
INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURE OF
OBJECTS IN REMOTE SENSING, 3., Les Arcs, France, Dec.
16-20, 1985. **Proceedings.** Noordwijk, ESA, 1986,
p. 306-314. (ESA SP-247).

- BOWKER, D.E.; DAVIS, R.E.; MYRICK, D.L.; VON OFENHEIM, W.H.C. Estimation of spectral reflectance signatures from spectral radiance profiles. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 17., Ann Arbor, MI, 1983. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1983, p. 795-814.
- BOWKER, D.E.; DAVIS, R.E.; MYRICK, D.L.; STACK, K.; JONES, W.T. **Spectral reflectances of natural targets use in remote sensing studies**. Washington, DC., NASA Langley Research Center, June 1985. (NASA RP-1139).
- BURROUGHS. **Burroughs advanced statistical inquiry system (BASIS)**; user's manual. Detroit, MI, 1975.
- CASTLE, K.R.; HOLM, R.G.; KASTNER, C.J.; PALMER, J.M.; SLATER, P.N.; DINGUIRARD, M.; EZRA, C.E.; JACKSON R.D.; SAVAGE, R.K. In-flight absolute radiometric calibration of the thematic mapper. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-22(3):251-255, 1984.
- CAVAYAS, F. Modeling and correction of topographic effect using multi-temporal satellite images. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 13(2):49-67, 1987.
- CHAVEZ, P.S. An improved dark - object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, 24(4):459-479, 1988.
- CRANE, R.B. Preprocessing techniques to reduce atmospheric and sensor variability in multispectral scanner data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 7., Ann Arbor, MI, 1971. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1971, p. 1345-1355.

- DUGGIN, M.J. Factors limiting the discrimination and quantification of terrestrial features using remotely sensed radiance. **International Journal of Remote Sensing**, 6(1):3-27, 1985.
- HOFFER, R.M. Biological and physical consideration in applying computer - aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P.H., DAVIS, S.M. ed., **Remote sensing: the quantitative approach**, New York, NY, McGraw - Hill, 1978, cap. 5, p.231 - 265.
- HOLBEN, B.; JUSTICE, C. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, 2(2):115-133, 1981.
- The topographic effect on spectral response from nadir - pointing sensor. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46(9):1191-1200, 1980.
- HORAN, J.J.; SCHWARTZ, D.S.; LOVE, J.D. Partial performance degradation of a remote sensor in space environment, and some probable causes. **Applied Optics**, 13(5):1230-1237, 1974.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II Carbonates. **Modern Geology**, 2(1):23-30, 1971.
- INEMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). Observções Meteorológicas em Bom Jesus da Lapa (Ba). Brasília (DF). Dez. 1988. Comunicação Pessoal.
- JUSTICE, C.O.; WHARTON, S.W.; HOLBEN, B.N. Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, 2(3):213-230, 1981.

- KIMES, D.S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetated canopies. **Applied Optics**, 22(9):1364-1372, 1983.
- KIRCHNER, J.A.; SCHNETZLER, C.C.; SMITH, J.A. Simulated directional radiances of vegetation from satellite platforms. **International Journal of Remote Sensing**, 2(3):254-264, 1981.
- KOLLENKARK, J.C.; VANDERBILT, V.C.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M.E. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance. **Applied Optics**, 21(7):1179-1182, 1982.
- KOWALIK, W.S.; MARSH, S.E. A relation between Landsat digital numbers surface reflectance and the cosine of the solar zenith angle. **Remote Sensing of Environment**, 12(1):39-55, 1982.
- MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. **Eosat Landsat Technical User Notes**, (1):3-8, 1986.
- Radiometric properties of U.S. processed Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environment**, 22(1):39-71, 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 semi-detálhe. Tese de Doutorado em Geociências. São Paulo, USP, 1986.

- MIDDLETON, E.M.; LU, Y.C. Evaluating the radiance transformation for normalizing Landsat data. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, West Lafayette, IN, 1982. **Proceedings**. West Lafayette, Purdue Research Foundation, 1982, p. 337-341.
- Using the solar elevation angle and radiances conversion to normalize forest spectral signatures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 17., Ann Arbor, MI, 1983. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1983, v. 2, p. 895-905.
- MURPHY, J.M.; BUTLIN, T.; DUFF, P.F.; FITZGERALD, A.J. Revised radiometric calibration technique for Landsat-4 TM data. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, GE-22(3):243-250, 1984.
- NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION). A prospectus for thematic Mapper research in the earth sciences. Greenbelt, MD, NASA, 1984. 71 p.
- NELSON, R.F. Reducing Landsat MSS scene variability. **Photogrammetric Engineering of Remote Sensing**, 51(5): 583-593, 1985a.
- Sensor - induced temporal variability of Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environment**, 18(1):35-48, 1985b.
- O'NEILL, N.T.; MILLER, J.R.; AHERN, F.J. Radiative transfer calculations for remote sensing applications. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 5., Victoria, 1978. **Proceedings**. Victoria, Pacific Forest Research Centre, 1978, p. 572-578.

- PIWINSKI, D.; SCHOCH, L.B.; DUGGIN, M.J.; WHITEHEAD, V.;
RYLAND, G. Dependence of NOAA-AVHRR recorded radiance
on scan angle atmospheric turbidity and unresolved
cloud. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF
THE ENVIRONMENT, 17., Ann Arbor, MI, 1983. **Proceedings.**
Ann Arbor, MI, ERIM, 1983, v. 2, p. 1043-1054.
- PRICE, J.C. Radiometric calibration of satellite sensors
in the visible and near infrared: history and outlook.
Remote Sensing of Environment, 22(1):3-9, 1987a.
- Calibration of satellite radiometers and comparison
of vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**,
21(1):15-27, 1987b.
- RAINES, G.L.; CANNEY, F.C. Vegetation and Geology. In:
SIEGAL, B.S.; GILLESPIE, A.R. ed., **Remote Sensing in
Geology**, New York, NY, Wiley, 1980. Cap. 12, p. 365-380.
- RICHARDSON, A.J. Relating Landsat digital count values to
ground reflectance for optically thin atmospheric
conditions. **Applied Optics**, 21(8):1457-1463, 1981.
- ROBINOVE, C.J. Computation with physical values from
Landsat digital data. **Photogrammetric Engineering and
Remote Sensing**, 48(5):781-784, 1982.
- ROSA, R. Estudo da influência das variações das condições
de iluminação (efeito topográfico) nos dados TM Landsat.
**Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto e
Aplicações.** Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto e
Aplicações. São José dos Campos, INPE, 1987. (INPE-
4463-TDL/320).

SCHNETZLER, C.C. Effect of sun and sensor geometry, canopy structure and density, and atmospheric condition on the spectral response of vegetation, with particular emphasis on across-track pointing. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURE OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, Avignon, France, Sept. 8-11, 1981.

Proceedings. Montfavet, INRA, 1981, p. 509-520. (Les Colloques de INRA).

SCHOWENGERDT, R.A.; ARCHWAMETRY, C.; WRIGLEY, R.C. Landsat thematic mapper imaged-derived MTF. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(9):1395-1406, 1985.

SERRA, P.R. Calibração do TM/LANDSAT-5 pelo INPE. Cachoeira Paulista (SP). Nov. 1988. Comunicação Pessoal.

SINGH, A. Post launch correction for thematic mapper 5 (TM-5) radiometry in the thematic mapper image processing system (TIPS). **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(9):1385-1390, 1985.

SLATER, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems.** London, Addison Wesley, 1980. 515 p.

——— A review of some radiometric calibration problems and methods. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, Bordeaux, Sept. 12-16, 1983. **Proceedings.** Montfavet, INRA, 1984, p. 392-405. (Les Colloques de INRA, 23).

——— Radiometric considerations in remote sensing. **Proceedings of the IEEE**, 73(6):997-1011, 1985.

- SLATER, P.N.; JACKSON, R.D. Atmospheric effects on radiation reflected from soil and vegetation as measured by orbital sensors using various directions. **Applied Optics**, 21(21):3929-3931, 1982.
- SLATER, P.N.; BIGGAR, S.F.; HOLM, R.G.; JACKSON, R.D.; MAO, Y.; MORAN, M.S.; PALMER, J.M.; YUAN, B. Reflectance-and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensor. **Remote Sensing of Environment**, 2(1)11-37, 1987.
- SMITH, J.A.; LIN, T.L.; RANSON, K.L. The lambert assumption and Landsat data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46(9):1183-1189, 1980.
- STAENZ, K.; MEYER, P.; ITTEN, K.I.; GOODENOUGHT, D.G.; TEILLET, P.M. Viewing angle corrections of airborne multispectral scanner data acquired over forested surfaces. In: IGARSS'86, Zürich, Sept. 8-11, 1986. **Proceedings**. Noordwijk, ESA, 1986, v. 1, p. 671-676. (ESA SP-254).
- TEILLET, P.M. Image corrections for radiometric effects in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, 7(12):1637-1651, 1986.
- TEILLET, P.M.; GUINDON, B.; GOODENOUGHT, D.G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 8(2):84-106, 1982.
- TURNER, R.E.; SPENCER, M.M. Atmospheric model for corrections of spacecraft data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, MI, 1972. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1972. v.1, p. 895-934.

- VITORELLO, I. Espectro de folhagens de cerrado. São José dos Campos (SP). Jul. 1989. Comunicação pessoal.
- WALRAVEN, R. Calculating the position of the sun. **Solar Energy**, 20(4):393-397, 1978.
- WATSON, R.D. Spectral reflectance and photometric properties of selected rocks. **Remote Sensing of Environment**, 2(2):95-100, 1972.
- WOODHAM, R.J.; LEE, T.K. Photometric method for radiometric correction of multispectral scanner data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 11(2):132-161, 1985.

APÊNDICE A

MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO (ABAIXO) DOS NÚMEROS DIGITAIS (ND)
AMOSTRADOS EM CADA BANDA ESPECTRAL, PARA CADA ALVO NAS
CINCO DATAS, E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE REFLECTÂNCIAS
APARENTES (R) E REFLECTÂNCIAS CORRIGIDAS (RC).

<u>BANDA 1</u>					
<u>DATA</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
<u>ALVO 1</u>					
ND	64,50	65,36	62,28	60,45	102,95
	2,460	2,301	1,378	2,197	2,268
R (%)	9,9361	9,0916	8,7218	8,7218	11,5148
	0,006	0,003	0,006	0,003	0,004
Rc (%)	3,3958	2,8101	3,7638	2,9473	2,9063
	0,003	0,003	0,006	0,003	0,002
<u>ALVO 2</u>					
ND	59,16	62,45	57,79	56,00	94,16
	3,310	2,063	3,229	2,628	2,884
R (%)	9,0171	9,0438	8,5930	8,4215	10,6324
	0,006	0,004	0,125	0,005	0,005
Rc (%)	2,5956	2,4953	3,0979	2,3826	2,2242
	0,005	0,003	0,125	0,004	0,005
<u>ALVO 3</u>					
ND	70,54	72,71	68,04	66,42	107,00
	3,110	2,390	2,718	2,975	4,626
R (%)	10,7403	10,5777	10,1508	10,0107	12,1797
	0,006	0,005	0,010	0,004	0,005
Rc (%)	4,2994	3,9790	4,6126	3,9351	3,3452
	0,004	0,003	0,010	0,004	0,005
<u>ALVO 4</u>					
ND	48,55	51,95	47,05	45,45	86,72
	1,580	1,084	0,891	0,985	1,601
R (%)	7,2600	7,4110	6,8751	6,7069	9,7132
	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Rc (%)	0,9500	0,9593	1,4601	0,7672	1,0582
	0,002	0,003	0,003	0,001	0,001
<u>ALVO 5</u>					
ND	52,40	52,24	52,92	51,15	85,92
	1,154	2,203	0,763	0,833	1,547
R (%)	7,8663	7,9184	7,7686	7,5719	9,6927
	0,003	0,004	0,003	0,002	0,004
Rc (%)	1,4649	1,2736	2,2755	1,5556	0,9257
	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001

BANDA 2

DATA	1	2	3	4	5
ALVO 1					
ND	26,00	26,82	25,36	24,17	44,04
	1,167	1,585	2,685	1,969	1,521
R (%)	7,7945	7,6861	7,4532	7,1379	10,1051
	0,005	0,005	0,004	0,007	0,005
Rc (%)	3,6058	3,4211	3,8168	3,1824	2,7776
	0,003	0,004	0,004	0,006	0,003
ALVO 2					
ND	22,29	24,00	22,70	21,05	38,20
	1,601	1,668	3,599	1,580	1,693
R (%)	6,6066	6,8129	6,5899	6,1632	8,74814
	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005
Rc (%)	2,5217	2,6547	3,0517	2,5010	1,4964
	0,005	0,005	0,005	0,005	0,001
ALVO 3					
ND	30,13	30,95	29,33	28,76	47,76
	1,753	1,745	2,974	1,480	2,567
R (%)	9,0586	8,9062	8,6409	8,5828	10,9648
	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007
Rc (%)	4,9626	4,7278	5,0858	4,7005	3,6731
	0,005	0,005	0,004	0,004	0,005
ALVO 4					
ND	19,25	19,97	18,65	18,92	37,15
	0,493	0,733	0,483	0,474	1,051
R (%)	5,5480	5,5057	5,2409	5,3824	8,3551
	0,002	0,003	0,002	0,002	0,003
Rc (%)	1,5352	1,4209	1,7654	1,5914	1,2264
	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
ALVO 5					
ND	20,64	21,84	21,00	20,96	36,56
	1,113	1,213	0,500	0,934	1,474
R (%)	5,9823	6,0637	5,9609	6,0193	8,2780
	0,004	0,004	0,002	0,003	0,004
Rc (%)	1,9114	1,9199	2,4352	2,1737	1,0465
	0,003	0,003	0,001	0,002	0,0002

BANDA 3

DATA	1	2	3	4	5
ALVO 1					
ND	28,45 2,377	28,56 2,332	26,73 1,601	25,95 1,718	50,52 1,675
R (%)	7,1400 0,006	6,8485 0,006	6,5741 0,004	6,4521 0,005	9,5879 0,004
Rc (%)	4,7983 0,006	4,4599 0,005	4,5399 0,004	4,2327 0,004	3,9453 0,003
ALVO 2					
ND	22,87 2,675	23,91 2,185	23,83 5,700	21,33 1,992	41,75 2,847
R (%)	5,7617 0,007	5,7397 0,006	5,8621 0,014	5,2896 0,005	7,9766 0,006
Rc (%)	3,4920 0,007	3,4317 0,005	3,8965 0,014	3,1449 0,005	2,4134 0,003
ALVO 3					
ND	34,31 2,749	34,80 2,337	32,00 2,626	32,33 1,879	55,00 4,159
R (%)	8,6498 0,007	8,3768 0,006	7,9098 0,007	8,0556 0,005	10,4506 0,008
Rc (%)	6,3746 0,007	6,0585 0,006	5,9353 0,007	5,9013 0,005	4,8576 0,007
ALVO 4					
ND	15,75 1,006	16,70 1,244	14,97 0,668	15,52 1,109	41,37 0,925
R (%)	3,8600 0,003	3,9087 0,003	3,5754 0,002	3,7526 0,003	7,7678 0,003
Rc (%)	1,6310 0,003	1,6423 0,003	1,6439 0,002	1,6466 0,003	2,2999 0,001
ALVO 5					
ND	16,24 1,809	17,76 1,164	18,16 0,701	16,04 0,888	34,88 2,297
R (%)	3,9233 0,004	4,1134 0,003	4,3200 0,002	3,3816 0,002	6,5949 0,005
Rc (%)	1,6621 0,004	1,8143 0,002	2,3586 0,001	1,6952 0,002	1,0481 0,003

BANDA 4

DATA	1	2	3	4	5
ALVO 1					
ND	25,00	25,60	23,47	23,08	40,82
	0,722	1,437	4,834	1,411	1,302
R (%)	3,9233	4,1134	4,3200	3,8316	6,5949
	0,003	0,005	0,005	0,005	0,004
Rc (%)	1,6621	1,8143	2,3586	1,6952	1,0481
	0,002	0,005	0,005	0,005	0,003
ALVO 2					
ND	18,24	19,50	18,66	17,41	31,92
	2,550	3,426	2,543	2,652	2,737
R (%)	6,6631	6,8276	6,7475	6,2684	8,9620
	0,010	0,013	0,010	0,010	0,009
Rc (%)	5,1492	5,3838	5,5049	4,9297	3,5185
	0,010	0,012	0,012	0,010	0,002
ALVO 3					
ND	29,18	28,90	27,71	26,66	44,47
	2,322	2,022	1,521	1,527	2,657
R (%)	10,8073	10,2224	10,1581	9,7423	12,4883
	0,009	0,008	0,002	0,006	0,008
Rc (%)	9,2865	8,7716	8,9095	8,3969	7,0042
	0,009	0,008	0,002	0,006	0,007
ALVO 4					
ND	51,75	55,55	46,32	46,85	51,10
	1,765	1,782	1,047	1,459	1,104
R (%)	19,4453	19,8970	17,1665	17,3651	14,2476
	0,007	0,007	0,001	0,006	0,004
Rc (%)	17,9557	18,4787	15,9459	16,0498	8,8856
	0,007	0,006	0,001	0,005	0,003
ALVO 5					
ND	6,88	7,88	8,20	6,60	20,28
	0,665	1,423	0,816	1,581	2,424
R (%)	2,7139	3,0044	3,1041	2,5050	5,7863
	0,008	0,009	0,002	0,009	0,009
Rc (%)	1,2023	1,5838	1,8659	1,2444	0,6388
	0,007	0,008	0,002	0,006	0,001

BANDA 5

DATA	1	2	3	4	5
ALVO 1					
ND	41,78 2,392	44,40 2,719	42,63 2,920	40,56 2,889	76,73 3,345
R (%)	9,4336 0,006	9,6200 0,006	9,4732 0,006	9,0444 0,007	13,3746 0,006
Rc (%)	9,7234 0,006	9,8855 0,006	9,7563 0,006	9,3329 0,007	12,8691 0,006
ALVO 2					
ND	32,40 4,615	34,75 5,109	34,32 6,866	32,29 4,905	57,62 6,566
R (%)	7,4658 0,012	7,8395 0,013	7,7317 0,016	7,5419 0,012	10,2588 0,013
Rc (%)	7,8344 0,012	8,1838 0,013	8,0824 0,016	7,9001 0,012	9,9561 0,013
ALVO 3					
ND	61,04 4,923	62,76 4,857	62,57 4,770	61,19 5,736	96,09 8,490
R (%)	14,3378 0,012	14,1884 0,012	14,4448 0,012	14,3286 0,015	17,0763 0,016
Rc (%)	14,7101 0,012	14,5310 0,012	14,8009 0,012	14,6857 0,015	16,7801 0,016
ALVO 4					
ND	48,02 1,832	50,37 1,628	46,30 1,950	46,68 1,404	89,55 2,286
R (%)	11,1916 0,006	10,8843 0,003	10,5651 0,006	10,5914 0,004	15,8431 0,006
Rc (%)	11,5564 0,006	11,2225 0,003	10,9134 0,006	10,9434 0,004	15,5540 0,006
ALVO 5					
ND	5,00 1,500	5,57 1,579	6,48 1,326	6,20 1,696	20,52 1,475
R (%)	0,8305 0,005	0,8144 0,005	1,1494 0,005	1,1142 0,005	9,3644 0,007
Rc (%)	1,1916 0,005	1,1425 0,004	1,5028 0,005	1,4675 0,005	3,4002 0,006

BANDA 7

DATA	1	2	3	4	5
ALVO 1					
ND	19,34	19,91	19,60	17,56	35,73
	2,308	1,378	1,339	1,949	1,684
R (%)	6,3480	6,6841	6,2746	5,6306	9,3644
	0,008	0,006	0,004	0,007	0,005
Rc (%)	6,9799	7,2853	6,8778	6,2559	9,8296
	0,008	0,006	0,004	0,007	0,005
ALVO 2					
ND	15,83	15,41	17,50	14,08	27,58
	2,745	3,229	6,303	0,019	3,412
R (%)	5,2494	5,0194	5,5431	4,5153	7,3266
	0,010	0,125	0,023	0,008	0,010
Rc (%)	5,8919	5,6315	6,1610	5,1512	7,7997
	0,010	0,125	0,023	0,008	0,010
ALVO 3					
ND	29,52	30,09	29,95	27,80	46,38
	3,342	2,718	3,057	0,822	4,790
R (%)	10,3818	10,1886	10,3616	9,41937	12,5111
	0,013	0,010	0,127	0,003	0,0013
Rc (%)	11,026	10,8937	10,9942	10,0405	12,9873
	0,0013	0,010	0,126	0,003	0,013
ALVO 4					
ND	9,5	10,02	14,92	9,46	28,95
	1,195	0,891	0,797	0,979	1,518
R (%)	2,8813	2,6626	4,8025	2,6688	7,6292
	0,005	0,003	0,004	0,001	0,005
Rc (%)	3,5136	3,2546	5,4215	3,2950	8,0948
	0,005	0,003	0,004	0,001	0,005
ALVO 5					
ND	1,20	1,60	1,80	1,72	9,16
	0,408	0,763	0,763	2,581	1,885
R (%)	0,1153	0,2219	0,2193	0,1642	2,1199
	0,001	0,003	0,002	0,009	0,006
Rc (%)	0,2161	0,4409	0,5125	0,4009	2,5736
	0,001	0,003	0,002	0,009	0,006