

Maurício Alves Moreira

FUNDAMENTOS DO
SENSORIAMENTO REMOTO
E METODOLOGIAS DE APLICAÇÃO

1ª Edição – São José dos Campos – SP – 2001

CAPA: Kleber de Castro

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Moreira, Mauricio Alves
Fundamentos do ensoriamiento remoto e
metodologias de aplicação / Mauricio Alves
Moreira. – São José dos Campos : Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001

Bibliografia.

1. Sensoriamento remoto I. Título.

01-2514

CDD-621.3678

Índice para catalogação sistemático:

1. Sensoriamento remoto: Tecnologia
621.3678
2. Sensoriamento remoto: Aplicação: Metodologia:
Tecnologia 621.3678

ISBN - 901991

AGRADECIMENTOS

Aos colegas e Pesquisadores: Antônio Roberto Formaggio, Bernardo F.Theodor Rudorff, Tereza G. Florenzano, Yosio E. Shimabukuro e José Carlos Neves Epiphanio pelas valiosas sugestões.

A Dra Thelma Krug pelo empenho para que este livro fosse publicado,

O Autor

*“Se teus projeto são para um
ano – semeia o grão. Se são
para dez anos – planta uma
árvore. Se dão para cem anos
– instrua o povo. Semeando
uma vez o grão – comerás
uma vez. Plantando uma
árvore – colherás dez vezes.
Instruindo o povo – colherás
cem vezes”*

*À minha esposa Tânia e às minhas
filhas Patrícia, Camila e Mariana,
Dedico
Aos meus Pais
Ofereço*

Índice

CAPÍTULO 1 – Radiação solar	15
Origem da Radiação Solar	15
Natureza da Radiação Solar	16
<i>Teoria Corpuscular</i>	17
<i>Teoria Ondulatória</i>	18
<i>Conceito de ondas</i>	18
<i>Algumas propriedades das ondas</i>	19
<i>Ondas eletromagnéticas</i>	20
Leis da Radiação	22
<i>Lei de Planck</i>	22
<i>Lei de Wien</i>	24
<i>Lei de Stefan-Boltzmann</i>	24
<i>Lei de Kirchoff</i>	24
Unidades de Medidas da Radiação Eletromagnética	25
CAPÍTULO 2 – Atmosfera Terrestre e sua interação com a Radiação solar	27
Interação da Radiação Solar com a Atmosfera Terrestre	30
<i>Espalhamento</i>	31
<i>Espalhamento molecular ou Rayleigh</i>	32
<i>Espalhamento Mie</i>	33
<i>Espalhamento não-seletivo</i>	33
<i>Absorção Atmosférica</i>	33
CAPÍTULO 3 – Noções Básicas de Solos e a Interação com a Radiação Solar	35
Origem dos Solos	36
Composição do Solo	43
<i>Constituintes Minerais</i>	44
<i>Material Orgânico</i>	45
<i>Água no Solo</i>	46
<i>Ar no Solo</i>	46
Solos de Maior Ocorrência no Brasil	47
<i>Latossolos</i>	47
<i>Latossolo Ferrífero</i>	48
<i>Latossolo Roxo</i>	48
<i>Latossolo Vermelho-Escuro</i>	48
<i>Latossolo Vermelho-Amarelo</i>	48
<i>Latossolo Amarelo</i>	48

<i>Latossolo Variação Una</i>	49
<i>Latossolo Bruno</i>	49
<i>Terra Roxa Estruturada</i>	50
<i>Podzólico Vermelho-Amarelo</i>	50
<i>Solos Orgânicos</i>	50
<i>Glei Húmico e Glei Pouco Húmico</i>	50
Interação da Radiação Eletromagnética com os Constituintes do Solo	51
<i>Transição Intra-atômica</i>	52
<i>Transferência de Carga ou Transições Inter-elementos</i>	53
<i>Transições da Banda de Valência à Banda de Transição</i>	53
<i>Absorção de Origem Molecular</i>	53
Parâmetros que Influenciam a Reflectância dos Solos	53
<i>Óxidos de Ferro</i>	54
<i>Matéria Orgânica</i>	59
<i>Rugosidade e Formação de Crosta Superficial</i>	60
<i>Umidade do Solo</i>	60
<i>Distribuição do tamanho de Partículas</i>	61

CAPÍTULO 4 – Noções Básicas sobre Vegetação e sua Interação com a Radiação Solar 63

Anatomia da Planta	63
<i>Raízes</i>	64
<i>Caulo</i>	65
<i>Folhas</i>	65
<i>Funções das folhas na planta</i>	66
<i>Respiração</i>	66
<i>Transpiração</i>	67
Interação da Radiação Solar com a Planta	67
Porção Absorvida da Radiação Solar	69
Utilização da Energia Solar na Fotossíntese	70
<i>Reações da Luz ou Fotoquímicas</i>	70
<i>Reações escuras</i>	77
<i>Porção Refletida da Radiação Solar</i>	78
<i>Região do Visível</i>	79
<i>Região do Infravermelho</i>	81
Fatores Morfológicos e Fisiológicos da Planta Envolvidos na Interceptação, absorção e Reflectância da luz pelas Folhas	81
Fatores Morfológicos	81
Fatores Fisiológicos ou Funcionais	82
<i>Idade da Planta</i>	82
<i>Déficit hídrico</i>	83
<i>Tipo e espessura das folhas</i>	84
<i>Nutrientes</i>	85
<i>Conteúdo de Água na Folha</i>	86
Interação da radiação Solar com o Dossel Vegetativo	87

CAPÍTULO 5 – Noções Básicas sobre a Água e sua interação com a radiação Solar 93

Estrutura Molecular da Água	93
Interação da Radiação Eletromagnética com a Água	94

Fatores que Interferem na Reflectância da Água	95
CAPÍTULO 6 – Sistema Sensores	99
Caracterização dos Sistemas Sensores	100
Classificação dos Sistemas Sensores	104
<i>Quanto a Fonte de Radiação</i>	105
<i>Quanto ao Princípio de Funcionamento</i>	105
<i>Quanto ao Tipo de Produto</i>	106
Níveis de Coleta de Dados Espectrais	110
CAPÍTULO 7 – Sistema Sensores Utilizados para Coleta de Dados Espectrais em Nível Terrestre	113
Sensores que Operam na Região do Visível e do Infravermelho Próximo	113
Sensores que Operam na Região do Infravermelho Termal	115
Sensores que Operam na Região de Microondas (> 1mm)	116
Descrição de Alguns Tipos de Sistemas Sensores Utilizados no Nível Terrestre	116
<i>Spectron SE-590</i>	116
<i>Sensor Quântico LI-190 SA</i>	118
<i>Sensor LAI-2000</i>	119
<i>Sensor Thermopoint</i>	122
<i>Sensor Ger Iris Mark-IV</i>	123
CAPÍTULO 8 – Sistemas Sensores Utilizados ao Nível Suborbital	125
Sensores Fotográficos	125
<i>Tipos de Filmes</i>	126
<i>Filme preto e branco</i>	127
<i>Filmes Coloridos</i>	128
Sensores Hiperespectrais	130
<i>AVIRIS</i>	131
<i>HYDICE</i>	132
<i>VIDEOGRAFIA</i>	134
Características dos Equipamentos de Videografia	134
CAPÍTULO 9 – Sensores Utilizados para Coleta de Dados em Nível Orbital	139
Imageadores Eletro-óptico-mecânico	140
<i>Sistema sensor MSS</i>	140
<i>Imageador TM</i>	142
<i>Imageador AVHRR</i>	145
Imageadores do Tipo CCD	146
<i>Imageador HRV</i>	146
Sensores Orbitais do Programa Espacial Brasileiro	148
Sensores Utilizados no Programa MECB	148
Sensores Utilizados no Programa CBERS	148
<i>Sistema sensor CCD</i>	149
<i>Sistema sensor IR-MSS</i>	149
<i>Sistema sensor WFI</i>	150
Sistema Sensores Ativos	151

CAPÍTULO 10 – Metodologia de Análise de Dados Coletados Por Sensores em Nível de Solo	157
Índice de Vegetação e Determinação a partir de Dados Radiométricos	158
Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pelo Dossel de Vegetação e Estimativa Através de Dados Radiométricos	162
<i>Etapas Empregadas para Estimativa da RFAA através do NDVI</i>	162
Eficiência do Uso da Radiação	165
CAPÍTULO 11 – Metodologia de Análise de Dados Coletados por Sensores em Nível Suborbital	167
Metodologia de Interpretação de Fotografias Aéreas	167
<i>Padrão</i>	168
<i>Tonalidade e Cor</i>	169
<i>Forma e Tamanho</i>	172
<i>Textura</i>	173
<i>Sombra</i>	174
Fotointerpretação Propriamente Dita	174
Cálculo de Área	175
<i>Método de Contagem</i>	175
<i>Método de Pesagem</i>	175
<i>Método de Planimetragem</i>	177
<i>Uso de Computador</i>	177
Interpretação de Dados Videográficos	177
<i>Captura das Cenas de Interesse</i>	177
<i>Mosaicagem e Georeferenciamento dos Frames</i>	178
CAPÍTULO 12 – Considerações Gerais sobre Análise de Imagens Coletadas por Sensores em Nível Orbital	179
Fatores que Contribuem para o Êxito na Análise de Imagens de Satélites	179
<i>Época de Obtenção de Imagens de Satélite</i>	179
<i>Tipo de Produto</i>	181
<i>Bandas Espectrais</i>	183
<i>Escala de Trabalho</i>	183
<i>Uso de Imagens Multitemporais</i>	186
<i>Experiência do Fotointérprete</i>	186
CAPÍTULO 13 – Interpretação Visual de Dados Orbitais	189
Análise do Material Colateral	190
Preparo do Material	191
Estabelecimento do Método de Interpretação	192
<i>Chave de Interpretação pelo Método Seletivo</i>	192
<i>Chave de Interpretação pelo Método Eliminatório</i>	192
<i>Interpretação pelo Método Sistemático</i>	194
Confiabilidade do Mapeamento	195
<i>Amostragem</i>	197
<i>Unidade de Amostragem</i>	198

<i>Tamanho da Amostra</i>	198
<i>Validação da Exatidão do Mapeamento</i>	199
CAPÍTULO 14 – Processamento de Imagens Digitais	203
Geoprocessamento	204
<i>Características dos SIGs</i>	206
<i>Configuração de um SIG</i>	206
<i>Interface</i>	207
<i>Entrada e Integração de Dados</i>	207
<i>Consulta e Análise Espacial</i>	207
<i>Visualização e Plotagem</i>	208
<i>Banco de Dados Geográficos</i>	208
Representação Matricial	210
Representação Vetorial	210
Funções de Manipulação e Análise de Dados Geográficos	211
<i>Análise Geográfica</i>	211
<i>Tratamento de Imagens</i>	211
<i>Modelagem Numérica do Terreno</i>	211
<i>Geodésia e Fotogrametria</i>	212
<i>Modelagem de Redes</i>	212
Objetos Não-Espaciais	212
Exibição e Produção Cartográfica	213
CAPÍTULO 15 – Tratamento de Dados Digitais	215
A Cor no Processamento de Imagens Digitais	215
Tratamento de Dados Digitais	218
<i>Pré-processamento</i>	219
<i>Eliminação de ruído</i>	219
<i>Realce de imagem</i>	220
<i>Correção, retificação geométrica e registro</i>	221
<i>Redução da dimensionalidade</i>	222
<i>Correção radiométrica</i>	222
Transformações de Imagens Digitais	226
<i>Rotação Espectral</i>	227
<i>Restauração</i>	227
<i>Imagem NDVI</i>	228
<i>Modelo Linear de Mistura Espectral</i>	229
Sistemas de Classificação de Imagens Digitais	230
<i>Classificação Supervisionada</i>	231
<i>Máxima verossimilhança – MAXVER</i>	231
<i>Método do Paralelepípedo</i>	235
<i>Classificação Não-supervisionada</i>	237
<i>Classificadores Por Regiões</i>	238
<i>Segmentação de Imagem</i>	238
<i>Extração de Regiões</i>	239
<i>Classificação</i>	239
Bibliografias	241

Prefácio

O sensoriamento remoto, para recursos naturais, tem sido definido de várias maneiras. Porém, todas elas expressam um objetivo comum, ou seja, o conjunto de atividades utilizadas para obter informações a respeito dos recursos naturais, renováveis e não renováveis do planeta Terra, através da utilização de dispositivos sensores colocados em aviões, satélites ou, até mesmo, na superfície. Em algumas definições há até menção de trocas energéticas entre os objetos ou fenômenos com o meio ambiente. De qualquer forma, percebe-se, claramente, que o enfoque maior é transmitir a idéia de uma nova tecnologia (conjunto de programas "softwares" e equipamentos "hardwares") colocada à disposição do homem, para auxiliá-lo nas indagações sobre o manejo do meio ambiente.

Esta forma de conceituar o sensoriamento remoto é válida sob o ponto de vista tecnológico, uma vez que, possibilita ao homem obter outros tipos de informações acerca dos recursos naturais, além daqueles perceptíveis pelos órgãos do sentido, ou seja, através do olfato, da gustação, do tato, da audição e da visão. Entretanto, o sensoriamento remoto, sob o ponto de vista prático (aplicação), é algo mais do que "softwares" e "hardwares". Poder-se-ia dizer que ele engloba, além de "softwares" e "hardwares", o conhecimento básico de todos os componentes que direta ou indiretamente fazem parte do "sistema" sensoriamento remoto. Neste contexto deve ser incluídos a radiação solar, a atmosfera terrestre, o solo, a vegetação e a água. Por exemplo, de nada valeria uma pessoa com profundo conhecimento de determinado sistema sensor, sem entender do comportamento da radiação que incide neste sistema. O mesmo argumento valeria para o caso inverso, isto é, entender a radiação e não saber nada sobre o sistema utilizado para registrá-la.

Não resta dúvida de que a literatura é farta em informações sobre cada um destes componentes do, então, chamado "sistema" de sensoriamento remoto (radiação solar, atmosfera, solo, vegetação, água, etc). Entretanto, na maioria dos casos, essas informações estão dispersas ou, quando juntas, carecem de detalhamentos sobre determinados tópicos. Por exemplo, raramente encontra-se, em qualquer publicação direcionada ao sensoriamento remoto, uma visão clara sobre a interação da radiação solar com a vegetação; porquê de a radiação solar em determinadas faixas espectrais ser mais absorvida do que em outras faixas espectrais do espectro eletromagnético. Geralmente, comenta-se que a radiação eletromagnética, na região do visível, é bastante absorvida pela vegetação verde, para ser utilizada nos processos fotossintéticos. A pergunta é, toda a radiação do visível é utilizada na fotossíntese? Onde ela é absorvida? Como ela é absorvida? São perguntas que têm respostas, porém encontram-se dispersas em várias áreas da Ciência. Como este exemplo, poder-se-ia citar outros tantos que,

freqüentemente, são comuns no dia a dia do analista de sensoriamento remoto.

Neste sentido, e pensando na infinidade de questionamentos, principalmente no que diz respeito aos conhecimentos básicos que o analista de sensoriamento remoto deve ter sobre os componentes do sistema como um todo, procurou-se, nesta publicação, introduzir além dos fundamentos do sensoriamento remoto (sistema sensores, tratamento de dados, etc), cinco capítulos abordando, de forma bem elementar, a radiação solar, a atmosfera terrestre, o solo, a vegetação e a água e a interação da radiação solar (radiação eletromagnética) com os demais componentes. Nos demais capítulos foram então abordados os sistemas sensores, os níveis de coletas de dados e a metodologia empregada no tratamento dos dados coletados através de sensores remotos. Além disso, em muitos dos assuntos abordados, foram inseridos tópicos complementares para auxiliar o leitor no entendimento dos assuntos discutidos.

O autor

Capítulo 1

Radiação Solar

A radiação solar é a fonte de energia para todos os processos físico-químicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre. Além de ser energia para os seres vivos, é a principal fonte de energia para a maioria dos sistemas sensores (sensores passivos). Assim, é fácil de perceber a importância de conhecer um pouco mais a respeito desta radiação, além daqueles conhecimentos que, tradicionalmente, são utilizados para desencadear uma seqüência de raciocínios sobre o sensoriamento remoto.

1.1 Origem da Radiação Solar

O sol é considerado uma estrela de quinta grandeza, constituída por uma massa gasosa, contendo aproximadamente 71% de hidrogênio e 26% de hélio. A superfície aparente do sol é denominada de fotosfera, cujo diâmetro aproximado é cerca de $1,3914 \times 10^6$ km. Possui uma massa aproximada de $1,99 \times 10^{30}$ kg, sendo que cerca de 90% concentra-se na metade interna do seu raio. A temperatura superficial média é de 5.770 K. Entretanto, por causa da pressão exercida pela massa colossal do sol, a temperatura no centro solar chega a 4×10^7 K. Essa altíssima temperatura promove o desencadeamento de reações nucleares, transformando o hidrogênio em hélio, através da fusão de núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio com perda de massa que é compensada por emissão de energia. Por ser reação que ocorre no núcleo do átomo de hidrogênio, ela é denominada de “**radiação**”. As radiações, em geral, são classificadas por letras do alfabeto grego (α , β , δ , etc), que podem ser ou não radioativas. A radiação solar é uma radiação do tipo β .

Para ter uma idéia da quantidade de radiação liberada no processo de fusão nuclear, que ocorre na zona radioativa do sol (Figura 1.1), a cada segundo, 657 milhões de toneladas de hidrogênio são transformadas em 653 milhões de toneladas de hélio. Essa diferença de 4 milhões de toneladas de massa de hidrogênio que foram transformadas em hélio, é convertida em radiação β . A radiação β ou emissão de partículas β pode ser um elétron ou um pósitron (elétron positivo) localizado no núcleo do átomo.

Como c é a velocidade da luz ($300.000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) e pode ser considerada uma constante, pode-se dizer, pela Eq. 1.6, que quanto maior a energia menor será o comprimento de onda λ , pela Eq. 1.5, que quanto maior o comprimento de onda menor será a frequência da radiação.

Com base nos resultados dos estudos do efeito fotoelétrico, e acreditando fortemente nas menções de Planck, Albert Einstein descobriu os paradoxos apresentados pelo efeito fotoelétrico. Segundo ele, as dúvidas a respeito da emissão de fótons poderiam ser esclarecidas se considerasse seriamente a noção proposta por Max Planck sobre a luminosidade de corpos quentes. Em outras palavras, a radiação é emitida descontinuamente em pequenos pulsos de energia. Surgiu daí, a *teoria corpuscular*.

Hoje, sabe-se, através da teoria quântica, que um elétron quando absorve energia do meio salta de um nível de energia (camada ou subcamada orbital) mais próximo do núcleo para um outro mais afastado, tornando-se o átomo instável e carregado negativamente. Para voltar à sua estabilidade o elétron transfere esta energia para outros átomos ou para o meio, através de um processo de transferência de energia. Sabe-se também que essa energia absorvida ou emitida pelo elétron, é uma quantidade discreta. Por esta razão é que se diz que certos fenômenos são mais bem explicados através da teoria corpuscular, enquanto que outros, através da teoria ondulatória.

1.2.2- Teoria Ondulatória

Foram discutidas, nos itens anteriores, as experiências e as dúvidas dos cientistas, que levaram Einstein a afirmar que a energia era emitida em forma de quantum, num determinado instante, e que se propagava como *quanta* individuais.

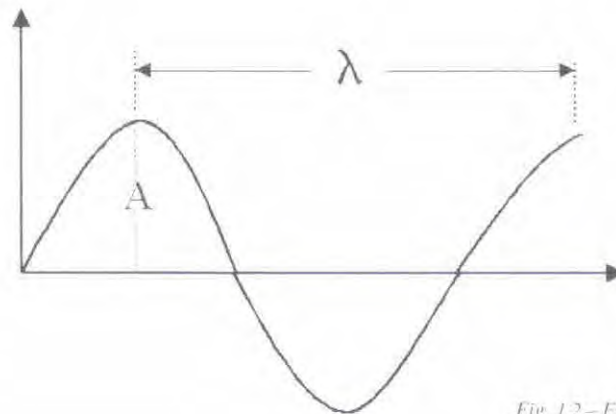
Por outro lado, a teoria ondulatória postula que a radiação solar propaga-se em linha reta, através de um campo eletromagnético em movimento ondulatório. Admite-se ser o movimento ondulatório porque todas as propriedades que foram observadas nos estudos de ondas também se aplicam às ondas eletromagnéticas e, por conseguinte, à radiação solar. Assim, para melhor entender o comportamento da radiação eletromagnética, segundo o ponto de vista ondulatório, fica evidente a importância de conhecer um pouco sobre ondas de modo geral e suas propriedades.

1.2.2.1 - Conceito de ondas

Ondas são perturbações periódicas ou oscilações de partículas ou do espaço, por meio das quais, muitas formas de energia propagam-se a partir de suas fontes. Todos os movimentos ondulatórios em um meio resultam de oscilações de partículas individuais em torno de suas posições de equilíbrio. Isto significa que uma onda progressiva é o movimento provocado por uma perturbação qualquer e não um deslocamento do meio em si mesmo. Exemplo bastante característico deste fenômeno são as "olas" em estádios de futebol, onde se percebe que há um movimento oscilatório, porém as pessoas permanecem nos mesmos lugares. Em outras palavras, uma onda não propaga matéria, cada partícula do meio oscila apenas em torno de sua posição de equilíbrio. As ondas propagam somente energia, que é transferida através de átomos e moléculas da matéria.

De modo geral, as ondas necessitam de um meio material para se propagarem, exceto as ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo.

Uma onda possui uma frequência e um comprimento. A frequência corresponde ao número de vezes que uma onda passa por um ponto do espaço num determinado intervalo de tempo, ou seja, ao número de oscilações da onda por unidade de tempo em relação a um ponto. A frequência é geralmente expressa em ciclos por segundo ou Hertz. O comprimento de onda indica a distância entre dois pontos semelhantes de onda, dado em metros (Figura 1.2).



A = Amplitude da Onda
λ = Comprimento da Onda

Fig. 1.2 – Esquema para mostrar uma onda transversal, onde A é a amplitude e λ é o comprimento.

As ondas são classificadas em função da forma, posição e sentido de propagação, ou seja:

- **Ondas senoidais:** São ondas que oscilam regularmente com uma única frequência e num mesmo comprimento de onda, conforme é mostrado na Figura 1.2.
- **Ondas transversais:** São ondas cujos picos e vales (cristas e depressões, como veremos mais tarde) formam ângulos retos com a direção do movimento. Exemplo, ondas que se propagam ao longo de uma corda.
- **Ondas longitudinais:** são ondas provocadas pelo movimento de partículas cuja vibração ocorre na mesma direção em que a onda se propaga, muito semelhante a uma mola espiral.

2.2.2.2 - Algumas propriedades das ondas

- Duas ou mais ondas de mesmas frequências, quando sobrepostas, formam uma única onda composta. Esta onda composta é resultado da adição simples dos deslocamentos das ondas componentes.
- Ondas que oscilam em fases diferentes, não se sobrepõem. Neste caso, elas se cancelam uma à outra. Este tipo de interação entre ondas é conhecido como interferência.
- Ondas podem ser refletidas quando encontram obstáculos. Se as ondas refletidas percorrerem a trajetória original da onda incidente elas se sobrepõem.
- A velocidade de uma onda depende da natureza do meio de propagação. Para um meio material elástico de massa específica μ e módulo de elasticidade E , a velocidade (V) de uma onda longitudinal é dada por:

$$V = (E/\mu)^{1/2} \quad (1.7)$$

No caso de ondas transversais temos que:

$$V = (G/\mu)^{1/2} \quad (1.8)$$

onde, G é o módulo de elasticidade transversal do material.

- Se uma onda passa de um meio para outro a mudança na velocidade resulta em mudança de direção do movimento. Esse fenômeno é conhecido por difração¹. Assim, quando a luz passa do ar para a água, ela é refratada ou encurva.

Quando uma onda encontra uma superfície de separação de dois meios, ela se refrata e se reflete. Isto é, a perturbação propagada pela onda incidente transmite-se ao segundo meio (onda refratada) mas, surge no primeiro meio uma nova onda que se propaga em sentido oposto (reflexão). Desta forma, parte da onda incidente é refletida. Em geral, as direções das ondas refratadas e refletidas são diferentes da direção da onda incidente e diferentes entre si.

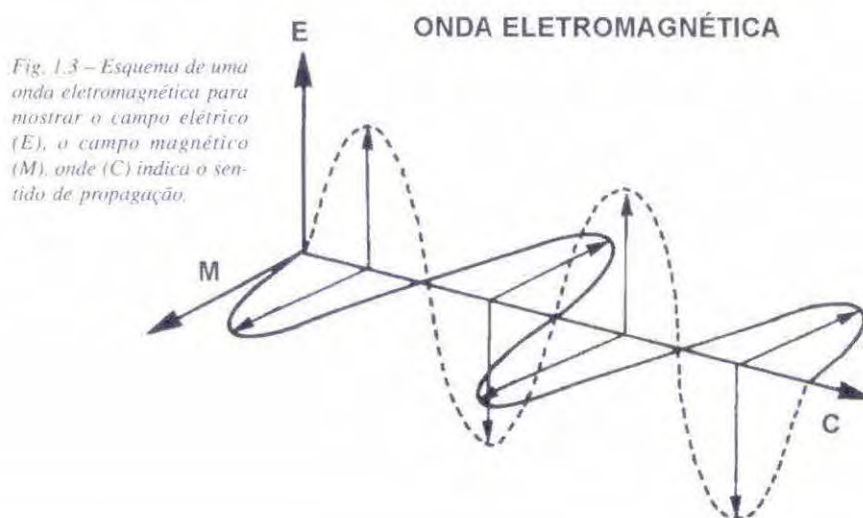
1.2.2.3 – Ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são do tipo transversal e não necessitam de um meio de propagação, ou seja, elas se propagam até mesmo no vácuo. A pergunta é, por que ondas eletromagnéticas?

Na física clássica, mais especificamente nos capítulos que tratam de eletricidade e magnetismo, encontra-se um postulado que diz “quando o elétron absorve uma quantidade discreta de energia (quanta) ele fica excitado, e gera em torno de si uma região que influencia uma carga de prova que for ali colocada. Esta região de influência é chamada de campo elétrico e existe sempre em torno de cargas elétricas”.

Por outro lado, até o século passado acreditava-se não haver nenhuma relação entre eletricidade e os fenômenos do magnetismo. Esta situação mudou quando o físico dinamarquês H.C. Oersted montou em seu laboratório um circuito elétrico próximo a uma agulha magnética. Ao passar uma corrente elétrica pelo fio, Oersted observou que a agulha se movimentava e se colocava perpendicularmente ao fio. Este fato permitiu a Oersted concluir que a corrente elétrica atuava como ímã, porque provocava o desvio na agulha magnética. Assim, ficou provado que entre duas cargas elétricas em movimento existe o campo elétrico e o magnético, ou seja, cria-se um campo elétrico e um campo magnético.

Na mesma época, o físico escocês Maxwell desenvolveu os princípios matemáticos da teoria eletromagnética para explicar a radiação eletromagnética. Neste estudo Maxwell concluiu que quando um campo magnético sofre variações numa dada região, aparece nesta, um campo elétrico. Este campo elétrico, por sua vez, faz aparecer um campo magnético e assim sucessivamente. Desta forma, a perturbação das cargas elétricas gera uma onda eletromagnética (Figura 1.3).



¹ A difração pode ser entendida como sendo o desvio ou expansão de ondas tais como ocorre com ondas marinhas e eletromagnéticas, quando encontram um obstáculo.

Hoje, sabe-se que existem diversas denominações para as radiações eletromagnéticas, que variam em função da frequência e, conseqüentemente, do comprimento de onda. Essas diferentes radiações eletromagnéticas receberam denominações que são de natureza histórica ou decorrente dos processos utilizados na sua produção ou determinação (Steffen et al., 1996):

Radiação Gama: são emitidas por materiais radioativos e pelo sol. Estas radiações localizam-se no espectro eletromagnético antes dos Raios X, ou seja, aquém de 1 Ângstron. Possuem altas frequências e, por isso, são muito penetrantes (alta energia). Na prática, têm aplicações na medicina (radioterapia) e em processos industriais, principalmente, na conservação de alimentos.

Raios X: são radiações cujas frequências de onda estão acima da radiação ultravioleta, ou seja, possuem comprimentos de onda menores. Esta denominação foi dada pelo seu descobridor, o físico alemão Wilhelm Röntgen, no ano de 1895, por não conhecer suas trajetórias. Os raios X surgem do interior da eletrosfera do átomo, por rearranjos eletrônicos. São muito usados em radiografias e em estudos de estruturas cristalinas de sólidos. Os raios X provenientes do sol são absorvidos pelos gases na alta atmosfera.

Radiação Ultravioleta (UV): são radiações compreendidas na faixa espectral de 0,01 a 0,38 μm . Estas radiações são muito produzidas durante as reações nucleares no sol. Entretanto, ao atingir o topo da atmosfera terrestre, elas são quase totalmente absorvidas pelo gás ozônio (O_3). O espectro do UV é dividido em três bandas: a) UV próximo (0,3 a 0,38 μm); b) UV distante (0,2 a 0,3 μm) e c) UV máximo (0,1 a 0,2 μm).

Radiação Visível (LUZ): é o conjunto de radiações eletromagnéticas compreendidas entre os comprimentos de ondas de 0,39 μm a 0,70 μm . As radiações contidas nesta faixa de comprimento de onda ao incidirem no sistema visual humano são capazes de provocar uma sensação de cor² no cérebro.

Quando se decompõe a luz branca por um processo qualquer, por exemplo, através de um prisma, o que se observa é que uma cor contém várias radiações eletromagnéticas de comprimentos de onda diferentes (diferentes frequências). Em outras palavras, radiações eletromagnéticas situadas entre 390 a 500 nm provocam, no sistema visual humano, a mesma sensação de cor azul. Assim, o que nosso cérebro identifica como cor azul é toda a radiação situada entre 390 e 500 nm.

Por outro lado, não existe um limite rígido entre duas cores do espectro visível. Os limites tabulados que existem na literatura são apenas teóricos para fins didático. Este fato é bem ilustrado na Figura 1.4, na qual se percebe claramente que a transição entre duas cores é difusa.



Fig. 1.4 – Decomposição da luz branca através de um prisma.

² O fato de o ser humano enxergar cores está ligado aos estímulos do cérebro, que utiliza este recurso para diferenciar uma onda da outra, ou melhor, uma frequência da outra. Assim, o vermelho possui uma frequência diferente do violeta. Por esta razão, pode-se dizer que na natureza não existem cores, apenas objetos que refletem ondas de frequências diferentes, que provocam no cérebro humano a sensação de cores.

Na Tabela 1.1 estão contidas as cores que compõem a luz branca e as respectivas faixas espectrais do espectro eletromagnético expressas em nanômetro (nm) e micrometro (µm).

Tabela 1.1 – Relação de cores e faixas espectrais na região do visível.

CORES	COMPRIMENTO DE ONDA	
	Nanometro (nm)	Micrometro (µm)
VIOLETA	400 a 446	0,40 a 0,446
AZUL	446 a 500	0,446 a 0,500
VERDE	500 a 578	0,500 a 0,578
AMARELO	578 a 592	0,578 a 0,592
LARANJA	592 a 620	0,592 a 0,620
VERMELHO	620 a 700	0,620 a 0,700

Radiação Infravermelha (IV): são radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda variam de 0,7 a 1000 µm. Situam-se no espectro eletromagnético entre a luz vermelha e as microondas. Às vezes, essas radiações recebem a denominação de radiação térmica. Esta radiação é dividida em três faixas espectrais: IV próximo (0,7 a 1,1 µm), IV médio (1,1 a 3,0 µm) e IV distante (3,0 a 1000 µm).

Microondas: são radiações eletromagnéticas que se estendem pela região do espectro de 1000 µm até cerca de 1×10^{-6} µm (1 m). Estas radiações são mais comumente referenciadas em termos de Hertz e seus múltiplos. Neste caso, elas estão compreendidas entre 300 GHz a 300 MHz.

Ondas de Rádio: é o conjunto de radiações com freqüências menores que 300 MHz (comprimento de onda maior que 1 m). Estas ondas são utilizadas principalmente em telecomunicação e radiodifusão.

O conjunto de todas estas radiações, desde os raios gama até as ondas de rádio, forma o espectro eletromagnético, que nada mais é do que a ordenação destas radiações em função do comprimento de onda e da freqüência (Figura 1.5).

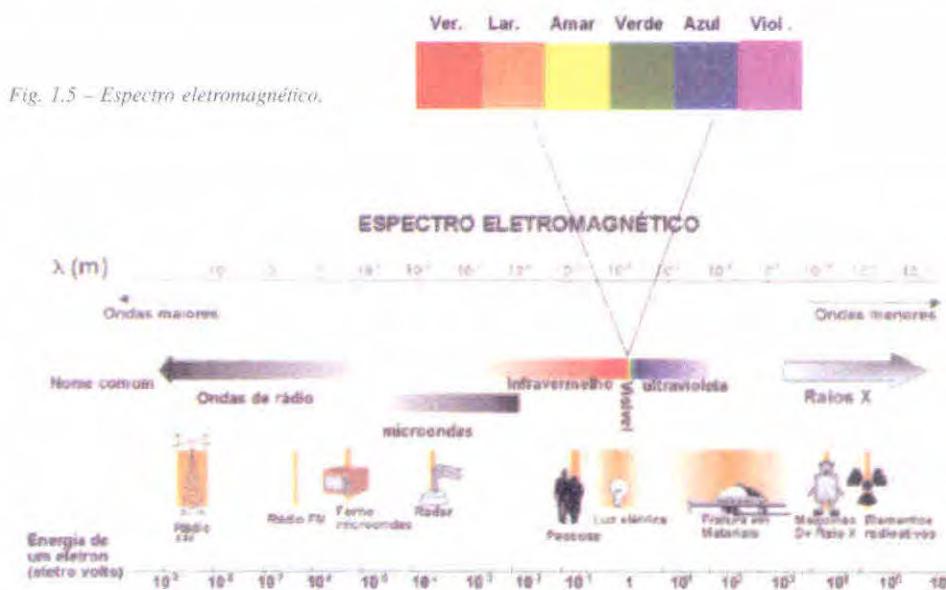


Fig. 1.5 – Espectro eletromagnético.

As reações nucleares que ocorrem no sol produzem várias radiações eletromagnéticas, com diferentes comprimentos de ondas contidos no intervalo entre 0,3 μm até 4,0 μm . Por esta razão elas são ditas radiações de ondas curtas, enquanto que as radiações produzidas pela emissão de energia da Terra são ditas de ondas longas (Figura 1.6). Além disso, o sol emite radiações eletromagnéticas com diferentes intensidades radiantes, sendo que as de maiores intensidades localizam-se na região do visível e do infravermelho próximo.

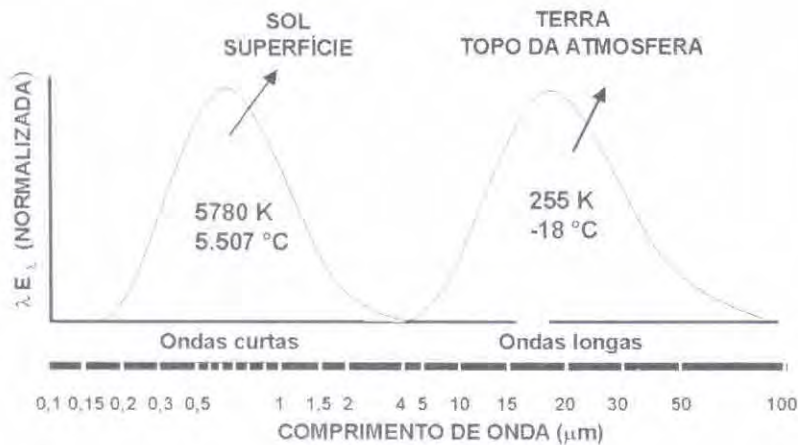


Fig. 1.6 – Espectro de emissão do sol e da Terra (A) e absorção pelos elementos da atmosfera (B)

1.3 Leis da Radiação

Para explicar as variações de intensidade da radiação eletromagnética, ao longo do espectro solar, foram criadas as chamadas **leis da radiação**. Entretanto, antes de discutir essas leis da radiação, é preciso ter em mente que todo corpo cuja temperatura esteja acima do zero grau absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 0 K) absorve ou emite radiação eletromagnética. Para elucidar este fenômeno de emissão dos corpos, inclusive do sol, foi criado um modelo teórico denominado de corpo negro. Segundo este modelo, o corpo negro tem a propriedade de absorver e/ou emitir toda energia que nele incidir, independente da faixa espectral e da direção da radiação. A seguir serão descritas as leis que tentam explicar o fenômeno de emissão da radiação.

1.3.1 – Lei de Planck

Esta lei foi desenvolvida para explicar a radiação emitida ($M\lambda$) por um corpo negro em todo o espectro eletromagnético, ou seja, dos raios gamas até as ondas de rádio. Além disso, ela explica a forma característica da curva de emissão de cada corpo. A lei de Planck é expressa por:

$$M\lambda = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1], \quad \text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (1.9)$$

onde, $M\lambda$ é a radiação emitida em cada comprimento de onda (espectralmente) para cada corpo (W m^{-2}), ε é a emissividade; C_1 é uma constante ($3,7413 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^4$); C_2 é outra constante ($1,4388 \times 10^4 \mu\text{m K}$); λ é o comprimento de onda da radiação (μm) e T é a temperatura em graus Kelvin.

A emissividade (ε) é a relação entre a emitância de um corpo real (M_{cr}) e a emitância de um corpo negro (M_{cn}) a uma dada temperatura. A emissividade de um corpo real é sempre menor do que a unidade e é calculada pela expressão:

$$\varepsilon = M_{cr}/M_{cn} \quad (1.10)$$

1.3.2 – Lei de Wien

Esta lei foi derivada da Lei de Planck (Eq. 1.9) em relação ao comprimento de onda. Através dela, pode-se determinar o comprimento de onda de máxima emitância espectral, para uma dada temperatura, ou seja, determinar qual é o comprimento de onda em que a radiação emitida é máxima (Figura 1.7). Esta lei é expressa pela seguinte equação:

$$\lambda_{\text{max}} = C/T \quad (1.11)$$

onde, $C = 2,898 \cdot 10^3 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$ denominada de constante de Wien (μm), T é a temperatura absoluta (K).

Por exemplo, considerando que a temperatura do sol seja de 5780 K e substituindo na Eq. 1.11, tem-se que λ_{max} corresponde a $0,50 \mu\text{m}$ (região do verde), ou seja, o comprimento de onda de máxima emitância do sol ocorre em $0,5 \mu\text{m}$, que está compreendido na faixa espectral da radiação visível.

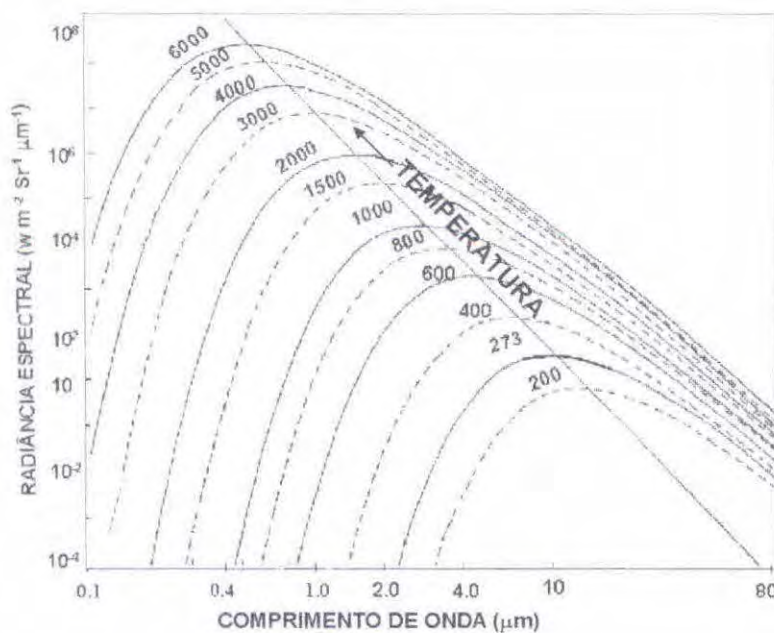


Fig. 1.7 – Lei do deslocamento de Wien.

1.3.3 – Lei de Stefan-Boltzmann

Esta lei é empregada para determinar a radiação total emitida (M) por um corpo em todo seu espectro.

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad , \text{ W m}^{-2} \quad (1.12)$$

Onde, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6693 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}^4$), ϵ é a emissividade.

1.3.4 – Lei de Kirchoff

Esta lei relaciona a radiação emitida por um corpo real (M_{cr}) com a emissão de um corpo negro (M_{cn}) através da seguinte equação.

$$M_{cn} = M_{cr} \cdot \alpha^{-1} \quad , \text{ W m}^{-2} \quad (1.13)$$

Onde, α é uma constante de proporcionalidade ($0 < \alpha < 1$).

1.4 – Unidades de Medida da Radiação Eletromagnética

A radiação eletromagnética é expressa em várias unidades, em função do comprimento de onda, para certas faixas do espectro eletromagnético, e da frequência para outras faixas.

Para radiações eletromagnéticas de comprimento de onda com dimensões muito pequenas, ou seja, aquelas radiações localizadas nas regiões do infravermelho, visível, ultravioleta, raios gama, etc. Utilizam-se, como unidades de referência, os submúltiplos do metro como o nanômetro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), micrometro ($1 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) e o Ângstron ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

Para a radiação com grandes comprimentos de ondas, como ondas de rádio, etc, a unidade de referência é dada em função da frequência. Como unidade de referência empregam-se os múltiplos do Hertz. Assim temos o quilohertz ($1 \text{ KHz} = 10^3$), o megahertz ($1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$) e o gigahertz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$).

Capítulo 2

Atmosfera terrestre e sua interação com a radiação solar

Do ponto de vista biológico, a atmosfera terrestre é indispensável à vida em virtude dos gases que contêm e por ser o filtro protetor de radiações solares com alto poder de penetração, como a radiação ultravioleta, raios X, etc.

A atmosfera terrestre possui uma massa que corresponde a 0,001% do total do planeta Terra e é constituída por uma mistura gasosa, por vapor de água e aerossóis. Essa camada gasosa apresenta espessura variável, porém pode chegar a mais de 1000 km de altitude. Apesar dessa extensa camada, a massa total dos gases que a compõem concentra-se, praticamente, nos primeiros 10 km de altitude.

A atmosfera exerce uma pressão sobre a superfície terrestre que é expressa por polegada quadrada. Ao nível do mar, a pressão é de aproximadamente 101 kilopascal, o que equivale a 1103 milibares (mb) ou a 760 milímetros de mercúrio (mmHg).

Devido às dimensões do planeta Terra (que gera uma força gravitacional muito grande), da densidade dos gases e de processo de aquecimento, a atmosfera possui uma estrutura vertical estratificada em zonas, designadas pelo sufixo “*SFERA*”, separadas por camadas identificadas pelo sufixo “*PAUSA*”. Entretanto, não existe uma separação nítida entre zonas e camadas e nem uma definição exata da espessura de cada uma dessas divisões.

De acordo com Cruz (1997), existem cinco zonas a saber: *troposfera*, *estratosfera*, *mesosfera*, *ionosfera* e *exosfera*, conforme são mostradas na Figura 2.1.

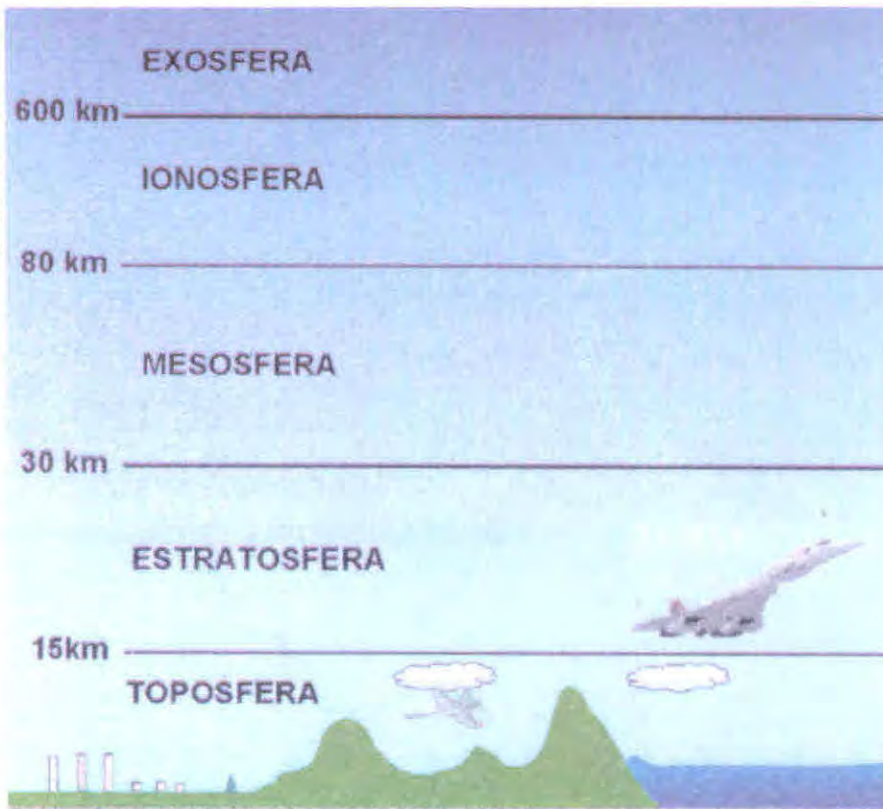


Fig. 2.1 – Esquema para mostrar as principais zonas da atmosfera terrestre.

Destas zonas atmosféricas, a *troposfera* é a mais importante do ponto de vista biológico, porque é dela que depende a vida da maioria dos seres terrestres. Entretanto, para o sensoriamento remoto, o estudo da atmosfera terrestre, como um todo, é fundamental porque ela constitui um meio natural que interfere tanto na radiação incidente (irradiância) quanto na parte da radiação que é refletida (radiância) pelos alvos da superfície que, eventualmente, será coletada pelos sistemas sensores. Em geral, essa interferência se manifesta na trajetória (fenômenos de refração, difração), na velocidade e absorção (total ou parcial) da radiação solar em determinadas faixas espectrais do espectro eletromagnético.

As descrições que se seguem, sobre as camadas da atmosfera, são baseadas em Cruz (1997):

- **Troposfera:** é a camada que está em contato com a superfície terrestre, cuja espessura varia em função da latitude. Na linha do equador a troposfera atinge cerca de 15 a 18 km e, nos pólos, cerca de 2 a 8 km de altura. Contém aproximadamente 80 % da massa total da atmosfera e é a camada de ar mais influenciada pelas transferências de energias que ocorrem na superfície da terra. É na troposfera que ocorrem os fenômenos meteorológicos, como a chuva, o vento, as nuvens, a neblina, o granizo, a neve, etc. Nesta região, a temperatura diminui com o aumento da altitude, na razão de 6 °C para cada 1000 metros. O calor na troposfera provém tanto do interior do planeta quanto da energia solar absorvida pelo ar. Esta camada é limitada na parte superior pela *tropopausa*. A principal função da tropopausa é servir de “armadilha de frio” para as moléculas de água, impedindo que elas escapem para as camadas superiores.

- **Estratosfera:** estende-se, a partir do final da tropopausa, podendo atingir uma altura aproximada de até 30 km a partir da superfície terrestre. Nesta região, a quantidade de oxigênio é bem pequena e não existe umidade. Ao contrário da troposfera a temperatura aumenta à medida que aumenta a altitude. Assim, enquanto em sua parte inferior a temperatura é aproximadamente de -40 °C, na sua parte mais alta, a temperatura cai para -2 °C. O aumento da temperatura é consequência da absorção da radiação

ultravioleta pelo ozônio (O_3), que constitui cerca de 1% do ar atmosférico. A camada que limita a estratosfera e a mesosfera, é denominada de *estratopausa*.

• **Mesosfera:** esta região inicia-se logo após a estratopausa e pode atingir até 80 km acima da superfície terrestre. É uma região rica em ozônio. Na mesosfera, a temperatura continua a aumentar até cerca de $10\text{ }^\circ\text{C}$, a uma altitude de mais ou menos 50 km, em relação à superfície da Terra, voltando a decrescer e de forma acentuada, ao chegar ao topo da camada a temperatura é de $-90\text{ }^\circ\text{C}$. A composição dos gases na mesosfera é mais ou menos constante e constituída de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e, no restante dos gases (1%) predomina o dióxido de carbono, vapor d'água e argônio. Esta camada, do ponto de vista de sensoriamento remoto, é importante porque é nela que ocorre a absorção de quase todas as radiações ultravioletas.

• **Ionosfera:** é a região da atmosfera superior da Terra, estendendo-se aproximadamente até 600 km de altitude. Nesta camada, o ar apresenta uma condutividade elétrica alta, em razão da separação das moléculas em íons e elétrons (ionização¹) pela radiação solar ultravioleta. A ionosfera é um refletor eficiente de ondas de rádio, na faixa espectral que vai das ondas curtas até as ondas longas, permitindo que as comunicações sejam feitas a grande distância ao redor da superfície terrestre. Todavia, a ionosfera não reflete ondas de rádio de alta frequência (inclusive televisão), razão pela qual, a transmissão de comunicações por estas ondas faz-se por satélites.

• **Exosfera:** é a zona mais externa da atmosfera, podendo chegar a 1000 km ou mais de altura em relação à superfície da Terra. Na exosfera predomina o hidrogênio (o gás mais leve² que se conhece) e por esta razão é, também, denominada de camada hidrogenada. Nesta região, as temperaturas variam de $2000\text{ }^\circ\text{C}$, durante o dia a $-300\text{ }^\circ\text{C}$, durante a noite.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial, a atmosfera terrestre é formada por uma mistura de gases que variam em concentração, sendo, porém, o nitrogênio e o oxigênio os gases mais abundantes conforme pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição média do ar seco próximo ao solo, em % volume ou PPM, segundo a organização meteorológica mundial (OMM).

COMPONENTES ESTÁVEIS (teor)		COMPONENTES VARIÁVEIS (teor)	
Nitrogênio	78,084 %	Ozônio	0 a 0,07 ppm
Oxigênio	20,946 %	SO ₂	0 a 1,0 ppm
Gás Carbônico	0,033 %	NO ₂	0 a 0,02 ppm
Argônio	0,934 %	CH ₂ O	traços
Neônio	18,18 ppm	Iodo	20 ppm
Hélio	5,24 ppm	NaCl	20 ppm
Criptônio	1,14 ppm	NH ₃	traços
Xenônio	0,09 ppm	CO	traços
Hidrogênio	0,50 ppm	Radônio	6×10^{-12} ppm
Metano	2,00 ppm		
N ₂ O	0,50 ppm		

FONTE: Reichardt (1993).

¹ Ionização: processo pelo qual um átomo ou molécula eletricamente neutro (número de prótons = número de elétrons) transforma-se positivamente ou negativamente carregados (perda ou ganho de elétrons). Neste caso, os átomos ou moléculas ionizados são chamados íons.

² O conceito de molécula mais leve ou mais pesada está relacionado com o peso molecular (soma dos pesos atômicos dos átomos da molécula), isto é, quanto maior o número de neutros no núcleo os átomos da molécula, maior será o peso molecular, por conseguinte, mais pesada será a molécula. Assim, a molécula de hidrogênio (H₂) tem peso molecular igual a 2 (dois prótons) enquanto que a molécula do hélio (He₂) tem peso molecular igual a 4. Neste exemplo, a molécula de Hélio é mais pesada do que a do hidrogênio.

2.1. Interação da Radiação Solar com a Atmosfera Terrestre

O fluxo total de energia solar no topo da atmosfera é de aproximadamente 1400 Wm^{-2} , o que equivale a $2,0 \text{ cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ (Szeicz, 1974; Gardner et al.; 1985). Entretanto, quando a radiação solar penetra na atmosfera terrestre, sofre atenuações causadas por reflexão, espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos, por partículas dispersas e nuvens. Isso faz com que a radiação global que chega na superfície terrestre esteja fortemente atenuada, conforme é mostrado na Figura 2.2.

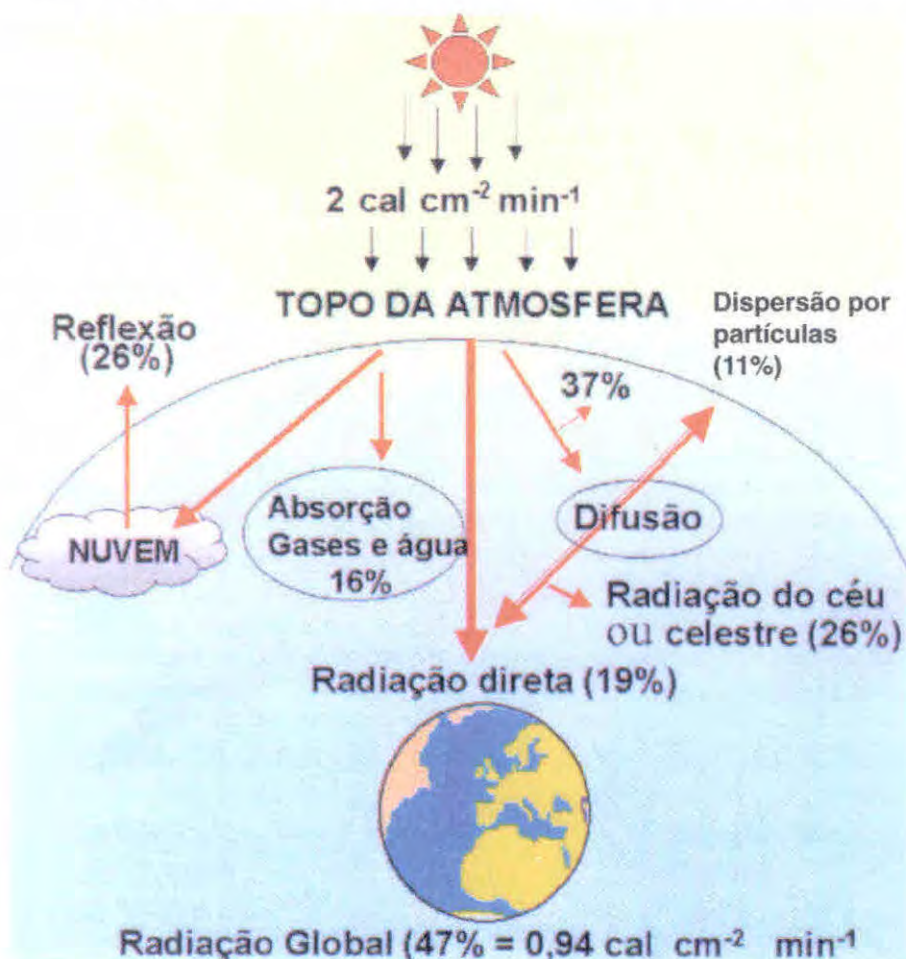


Fig. 2.2 – Causas das atenuações da energia solar ao atravessar a atmosfera terrestre.

A radiação solar que volta para o espaço sideral corresponde a 37%, sendo 26% refletida pelas nuvens e 11% pela dispersão das partículas que se encontram na atmosfera.

Os gases e vapor d'água são responsáveis pela absorção de 16% da radiação. Desta forma, somando as quantidades de radiações que voltaram para o espaço mais aquela que foi absorvida pelos gases e vapor de água, tem-se um total de 53% de perda da radiação global, o que corresponde a $1,06 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$. Assim, do total que chega no topo da atmosfera somente 47% atinge a superfície terrestre. Esta radiação recebe o nome de radiação global (Rg) e equivale, em média, $0,94 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

A radiação global é composta de raios solares diretos (19%) e raios difusos (26%), e é comumente chamada de radiação do céu ou celeste.

No capítulo 1, foi comentado que toda vez que um feixe de radiação passa de um meio menos denso para um mais denso, ele sofre uma mudança na trajetória, em consequência do decaimento na sua velocidade. Este decaimento é denominado de processo de refração.

A rigor, a radiação solar sofre vários processos de refração porque a concentração dos gases

que compõem a atmosfera é bastante variada nas diferentes zonas e camadas, conforme foi discutido. Além do processo de refração, certos gases constituintes, como o Ozônio e o CO_2 , absorvem a radiação solar em certos comprimentos de ondas. Essa absorção pode ser total, como é o caso da radiação ultravioleta (absorvida pelo Ozônio) ou parcial, como ocorre em quase todo o espectro a partir de $0,3 \mu\text{m}$, conforme é mostrado na Figura 2.3.

Existem também outros fatores complicadores, como partículas dispersas e presença de nuvens, que provocam o espalhamento da radiação.

As nuvens são a maior barreira à radiação solar, do ponto de vista do sensoriamento remoto, porque elas impedem a passagem da radiação solar na porção reflectiva do espectro eletromagnético, onde operam a maioria dos sistemas sensores, como veremos mais adiante.

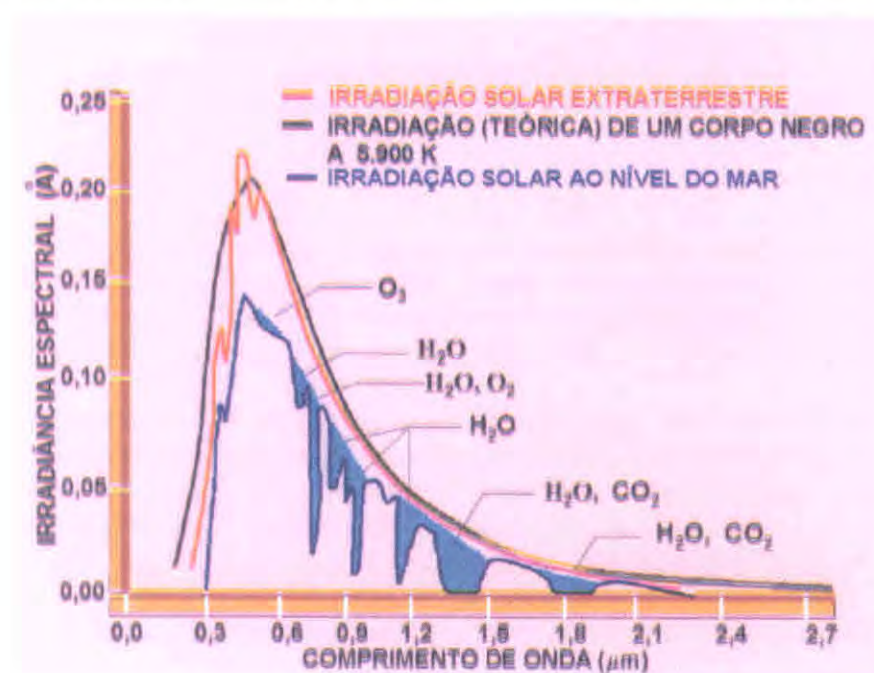


Fig.2.3 – Curva de irradiância solar, para mostrar a absorção da radiação, pelos gases e vapor d'água.
 FONTE: <http://br.geocities.com/kawakami.enc/>

2.1.1. Espalhamento

O espalhamento é um processo físico que resulta da obstrução das ondas eletromagnéticas por partículas existentes nas suas trajetórias ao penetrarem na atmosfera terrestre. Essa obstrução pode ser tanto da energia incidente quanto da energia re-irradiada (refletida). Na atmosfera, as partículas responsáveis pelo espalhamento de energia apresentam tamanhos variáveis. Há desde moléculas de gases naturais até grandes gotas de chuva e partículas de granizo, conforme é mostrado na Tabela 2.2. A intensidade e a direção do espalhamento depende fortemente da razão entre os diâmetros das partículas presentes na atmosfera e do comprimento de onda da energia eletromagnética incidente e/ou re-irradiada.

Tabela 2.2 – Partículas presentes na atmosfera e seus respectivos tamanhos.

PARTÍCULA	Variação no diâmetro (μ)
Fumaça, bruma	0,001 – 0,5
Fumos industriais	0,5 – 50
Poeira	1 – 5
Neblina, nuvens	2 – 30
Névoa	20 – 50
Garoa	50 – 200
Chuva	200 – 2000

De acordo com os tamanhos das partículas pode ocorrer três tipos de espalhamentos: o espalhamento *molecular* ou *Rayleigh*; o espalhamento *Mie* e o espalhamento *Não-Seletivo*.

2.1.1.1 – Espalhamento molecular ou Rayleigh

Quando a relação entre o diâmetro da partícula e o comprimento da onda eletromagnética é menor que 1 (μm), o espalhamento é considerado isotrópico, ou seja, é simétrico em relação à direção da onda incidente e em relação à intensidade. O espalhamento isotrópico é denominado *espalhamento molecular* ou *Rayleigh* e é produzido, essencialmente, por moléculas de gases constituintes da atmosfera.

As moléculas dos gases presentes na atmosfera terrestre espalham mais eficientemente a energia eletromagnética de menores comprimentos de ondas. A quantidade de radiação espalhada (E) é inversamente proporcional a quarta potência do comprimento de onda (λ), expressa pela relação $E = 1/\lambda^4$. Assim, quanto menor for o comprimento de onda, maior é o espalhamento. Por exemplo, a luz azul é espalhada em cerca de 5,5 vezes mais do que a luz vermelha porque tem comprimento de onda menor que esta.

Este tipo de espalhamento explica o motivo da sensação visual azulada do céu durante o dia, conforme é mostrado na Figura 2.4 (A) e a avermelhada no crepúsculo e pôr do sol (Figura 2.4B).

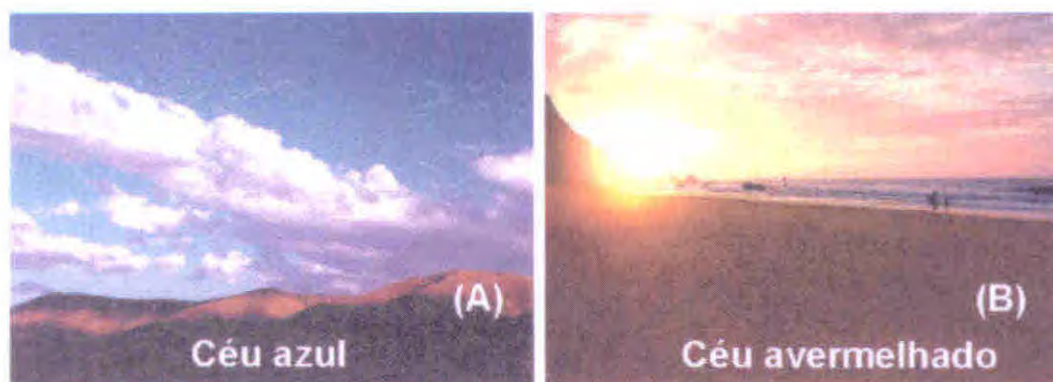


Fig. 2.4 – Foto para mostrar o efeito do espalhamento Rayleigh na coloração do céu.

Porquê o céu é azul durante o dia e vermelho no nascer e no por do sol?

A luz azul tem uma frequência muito próxima da frequência de ressonância dos átomos constituintes das moléculas dos gases da atmosfera terrestre, ao contrário da luz vermelha. Com isto, a luz azul

interage muito mais facilmente com a matéria (moléculas e átomos) do que a luz vermelha. Isto provoca um ligeiro atraso na luz azul que é ré-emitida em todas as direções, através do espalhamento *Rayleigh*. A luz vermelha, que não é dispersa e sim transmitida, continua em sua direção original. Por isso, quando se olha para o céu é a luz azul que se vê, pelo fato dela ter sido mais dispersada pelas moléculas dos gases em todas as direções. Por outro lado, a luz violeta é muito mais dispersada do que a luz azul. No entanto, não se vê o céu na cor violeta porque o sol produz muito mais luz azul do que violeta.

Por outro lado, quando o sol se encontra perto do horizonte os raios diretos que chegam aos nossos olhos, tem que atravessar uma massa de ar maior e a dispersão aumenta sua intensidade. Há uma grande atenuação no azul, restando o vermelho, que por ter maior comprimento de ondas sofre menos esse processo. Este efeito se acentua quando há poeira em suspensão na atmosfera (Figura 2.4B).

2.1.1.2 – Espalhamento *Mie*

O espalhamento *Mie* ocorre quando os diâmetros das partículas presentes na atmosfera são da mesma ordem ou próximos ao tamanho do comprimento de onda da radiação. Quando os diâmetros das partículas são de mesmo tamanho do comprimento de onda, o espalhamento *Mie* é proporcional a $1/\lambda^2$. Se o diâmetro for da ordem de $3/2$ de λ , o espalhamento será proporcional a $1/\lambda$.

2.1.1.3 – Espalhamento não-seletivo

O espalhamento é dito *não-seletivo* quando o tamanho das partículas existente na atmosfera deixa de ter influência no espalhamento. Isto é, o espalhamento vai se tornando independente do comprimento de onda à medida que aumenta o tamanho das partículas. Nesta situação, a energia é espalhada, preferencialmente, na direção da frente. Geralmente, este tipo de espalhamento ocorre quando o tamanho das partículas é muito maior do que os comprimentos das radiações eletromagnéticas que incidem sobre elas. Esse espalhamento é o responsável pela aparência branca das nuvens, como é mostrado no primeiro plano da Figura 2.4A.

2.1.2 – Absorção atmosférica

A absorção da radiação solar na atmosfera dá-se devido a dois processos: a) dissociação e fotoionização na alta atmosfera; b) vibração e transição rotacional de moléculas

No primeiro caso, temos a absorção da radiação nas faixas dos raios X e do ultravioleta e, no segundo caso, absorção na região do infravermelho. Na região do visível a absorção da radiação é muito baixa.

As moléculas de gases e vapor responsáveis por esses efeitos são: a) ozônio (O_3) e oxigênio (O_2), responsáveis pela absorção da radiação na região do ultravioleta; b) vapor de água, dióxido de carbono (CO_2) e óxido nítrico (N_2O), dentre outros, responsáveis pela absorção da radiação na região do infravermelho e microondas.

As regiões do espectro eletromagnético, para as quais a radiação não é absorvida, ou seja, a atmosfera é transparente, são denominadas de “janelas” conforme é mostrado na Figura 2.5.

Quando a radiação de determinados comprimentos de onda é pouco atenuada pela atmosfera (pouca absorvida), define-se aí uma janela atmosférica, para esta radiação. Observe, no gráfico da Figura 2.5, que as radiações de comprimentos de ondas entre 100 μm e 1 mm é toda absorvida pela atmosfera terrestre. Neste caso, deve-se evitar construir sensores remoto para medir esta radiação, pois nenhuma quantidade chegaria ao sensor.

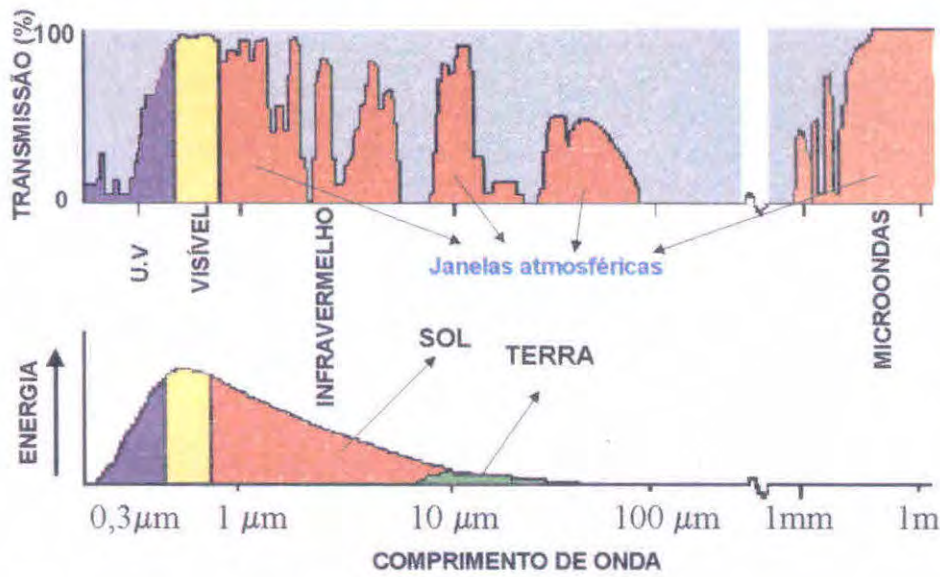


Fig. 2.5 - Curva espectral da radiação solar e da Terra e janelas atmosféricas, representadas pelas cores roxa, amarela, vermelha e marrom.

■ Comprimentos de ondas absorvidos pelos elementos na atmosfera

Por outro lado, quando a radiação eletromagnética passa do vácuo para um outro meio, ela se refrata e sua velocidade diminui de um fator “ η ” (*neta*) que é função do meio. Neste caso, o que modifica é o comprimento de onda, mantendo constante a frequência. A velocidade da radiação eletromagnética, no outro meio, é calculada por:

$$V = c/\eta$$

Onde, V é a velocidade no novo meio, c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 300.000 \text{ km/s}$) e η é o índice de refração do meio.

Assim, o fenômeno de refração é atribuído às diferentes velocidades da radiação ao passar por diferentes meios, sofrendo mudanças de direções. Para mostrar este fenômeno Snell estabeleceu uma lei que relaciona o seno do ângulo de incidência da radiação com o ângulo da radiação refratada. Esta lei postula que “quando a luz passa de um meio para outro mais denso, o seno do ângulo de incidência da radiação mantém uma razão constante com o seno do ângulo da radiação refratada”. Esta relação é expressa por:

$$\eta_1 \text{ sen}\theta_1 = \eta_2 \text{ sen}\theta_2 \quad (2.2)$$

Onde, θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e de refração respectivamente, e η_1 é o índice de refração do meio 1 e η_2 o do meio 2.

Considerando a passagem da radiação no vácuo igual a unidade ($\eta_1=1$) tem-se:

$$\text{sen}\theta_1 = \eta \text{ sen}\theta_2 \quad (2.3)$$

O índice de refração (η) é o valor com o qual se mede a capacidade que o material possui em causar refração. Por exemplo, entre o ar e o vidro, η vale 1,6; entre o ar e a água a 25°C , η vale 1,3. Isto equivale a dizer que, a luz viaja com velocidade de 1,6 vez mais rápida no ar do que no vidro e de 1,3 vezes mais rápida no ar do que na água. Radiações com diferentes comprimentos de ondas são refratadas em magnitude diferentes. Este processo é conhecido por dispersão.

Capítulo 3

Noções básicas de solo e a interação com a radiação solar

O solo pode ser definido como um corpo natural da superfície terrestre que tem propriedades devido aos efeitos integrados do clima, dos organismos vivos (plantas e animais) sobre o material de origem, condicionado pelo relevo durante um período de tempo.

Como corpo natural, cada solo ocupa um espaço tridimensional e está rodeado por outros solos de propriedades diferentes. O primeiro pesquisador a observar que os solos eram diferentes um do outro foi o geólogo russo Dokoutchaiev, analisando os solos da Ucrânia e da região de Gorki. Nessa época, Dokoutchaiev concluiu que essas diversidades eram principalmente ocasionadas pelas diferenças de clima.

Do ponto de vista agrícola, o solo pode ser entendido como sendo uma mistura de compostos minerais e orgânicos da superfície da Terra, que serve de substrato para o crescimento das plantas.

O pouco conhecimento dessa camada superficial da crosta terrestre e o manejo inadequado fizeram com que solos produtivos passassem a improdutivos ou até verdadeiros desertos. Assim, surgiu o interesse do homem em conhecer mais detalhadamente os tipos de solos e suas distribuições geográficas para se ter um controle mais efetivo das terras, aplicando técnicas adequadas a cada solo para evitar o desgaste natural. Desde então, muitas ferramentas têm sido usadas para o mapeamento dos solos em todo mundo.

Uma das ferramentas utilizadas para fazer o levantamento e reconhecimento dos solos é o sensoriamento remoto que, a partir de 1972, com o lançamento dos sistemas sensores para coleta de informações sobre recursos naturais, tem realizado muitas pesquisas na área de solo, para atender a esses objetivos. A grande vantagem do uso de sensoriamento remoto orbital é que essas informações são obtidas periodicamente, de modo que, constantemente, pode-se fazer uma adequação dos resultados obtidos em datas anteriores. Outra vantagem na utilização de dados coletados por sensores remotos orbitais diz respeito à visão ampla da área de estudo e à maior facilidade de fazer o levantamento e o acompanhamento do uso do solo em áreas de difícil acesso.

Devido a essa diversidade nos tipos de solos fica evidente a importância de se ter o conhecimento básico do solo e de suas propriedades, em qualquer tentativa do emprego das técnicas de sensoriamento remoto nos estudos sobre o meio ambiente, uma vez que ele é um dos substratos (superfície de fundo) de maior importância para os objetos da superfície terrestre estudados com auxílio de sensores remotos.

3.1 Origem dos Solos

As rochas da litosfera, quando expostas à atmosfera, ficam submetidas à ação direta do calor do sol, das águas das chuvas e das variações da pressão atmosférica, causando, assim, inúmeras modificações no aspecto físico e na composição química dos minerais que as compõem. A estes processos dá-se o nome de *intemperismo* ou meteorização. O intemperismo é o responsável pela formação do material que dá origem ao solo, o qual é chamado de *regolito* ou *manto de intemperização*. *Regolito* (do grego *Rhego* = coberta), camada superficial que recobre a rocha consolidada e que resulta da ação dos processos do intemperismo sobre a rocha. O regolito pode ser residual ou transportado.

Quando os processos envolvidos no intemperismo atuam mais no sentido de alterar o tamanho e o formato dos minerais, dá-se o nome de *intemperismo físico*. Se os processos atuam mais no sentido de *modificar a* composição química dos minerais, recebe a denominação de *intemperismo químico* ou simplesmente *decomposição*.

O intemperismo físico acontece porque os minerais que compõem a rocha possuem coeficientes de dilatação diferentes. Com a exposição à radiação solar e às variações na pressão atmosférica, alguns minerais dilatam mais que outros e, nesse processo de dilatação e contração, há o aparecimento de rachaduras, abrindo assim, o caminho para os agentes causadores do intemperismo químico.

O intemperismo químico é provocado, principalmente, pela água e sua intensidade é proporcional ao aumento da temperatura. Assim, quanto mais úmido e quente for o clima, mais intensa será a decomposição dos minerais. Sabe-se que, para cada 10 °C de aumento da temperatura, dobra-se a velocidade das reações químicas.

Nem todos os minerais que compõem a rocha têm a mesma facilidade de serem intemperizados. Alguns são mais resistentes do que outros. Na solidificação do magma (formação da rocha ígnea) os minerais que primeiro se cristalizam são as olivinas e os plagioclásios cálcicos, que também são os primeiros minerais a serem intemperizados. O quartzo é o último mineral a sofrer intemperização, conforme é mostrado na série de Bowen na Figura 3.1.



Fig. 3.1 - Série de Bowen, para mostrar a resistência dos minerais ao intemperismo.

Os minerais máficos (responsáveis pela cor escura da rocha) são os mais ricos em nutrientes (Ca, Mg, K, P, etc) e mais facilmente intemperizáveis em relação aos minerais félsicos, responsáveis pela cor clara da rocha.

As informações contidas na Figura 3.1 referem-se à formação do material de origem (regolito), através do intemperismo físico e químico. A partir do regolito, inicia-se a formação do solo propriamente dito.

Além dos fatores de formação do solo, conforme dito no início do capítulo, segundo Oliveira et al. (1992), há também os fatores pedogenéticos: adição, transformação, perdas e transporte interno.

Embora o ser humano faça parte dos organismos vivos, Primavesi (1981) coloca-o como sendo

o sexto fator de formação do solo. Muito provavelmente a autora quis ressaltar a importância do homem em mudar a paisagem rapidamente, inclusive o solo.

Dos elementos do clima destacam-se a temperatura e a precipitação pluviométrica. O calor do sol (expresso em temperatura) e as águas das chuvas atuam desde a desintegração da rocha até a formação do solo. Materiais derivados de uma mesma rocha poderão formar solos completamente diversos em climas diferentes. A razão disso é a maior ou menor decomposição da rocha e a velocidade das reações químicas, que são maiores nos climas mais quentes (Lepsch, 1976).

Analisando as condições dos baixos platôs amazônicos quentes e úmidos, do sertão nordestino quente e semi-árido e dos planaltos sulinos frios e úmidos, percebe-se que há diferenças apreciáveis no que concerne à formação de solos, a partir de um mesmo material de origem (Oliveira et al., 1992).

Na região amazônica a condição de elevada temperatura e farta precipitação pluvial ao longo do ano, a água percolada favorece as reações químicas nos solos, o transporte de compostos solúveis através do perfil desse, e a mineralização da matéria orgânica, constantemente adicionada à superfície através da serrapilheira (restos vegetais) de áreas florestadas. Na região amazônica os solos formados são bastante intemperizados, profundos, essencialmente caulíníticos, muito pobres quimicamente e com elevada acidez. Para enfatizar esta situação, na Figura 3.2 pode ser visto um perfil de um Latossolo Amarelo Álico.

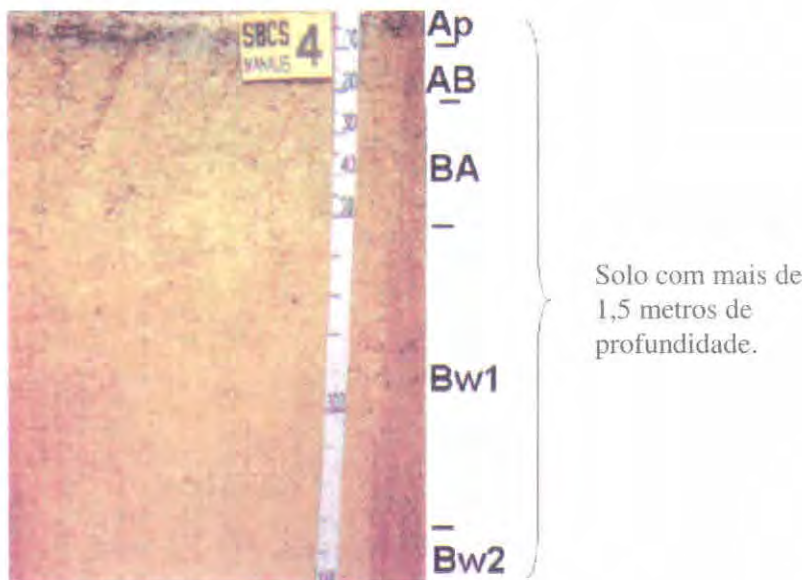


Fig.3.2 – Latossolo Amarelo Álico do Município de Manaus.
FONTE: Oliveira et al. (1992)

No nordeste semi-árido, a falta de água torna a umidade reduzida, contribuindo assim para a diminuição da velocidade e da intensidade dos processos pedogenéticos. Nesta situação, os solos formados são pouco desenvolvidos, rasos ou pouco profundos, cascalhentos e pedregosos. Essas condições, segundo ainda Oliveira et al. (1992), favorecem também a presença de solos pouco lixiviados, ricos em nutrientes, pouco ácidos e ligeiramente alcalinos. Às vezes, nesses solos pode ocorrer afloramento salino, comum em áreas onde a evapotranspiração potencial durante o ano suplanta a precipitação pluvial (Figuras 3.3 A e B).

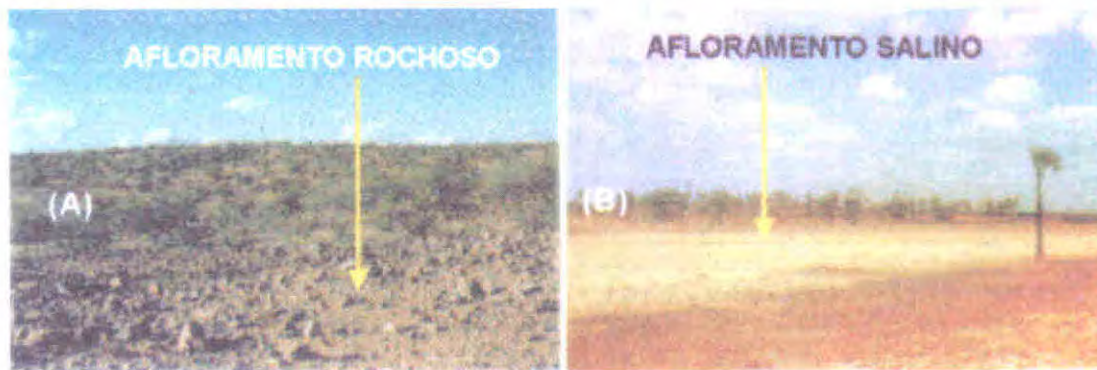


Fig.3.3 – Solo Bruno não Cálcico (A) e um solo Solonchak (B) – FONTE: Oliveira et al. (1992).

Nos planaltos salinos as baixas temperaturas e a constante umidade favorecem a presença de solos com espessas camadas superficiais escuras e ricas em matéria orgânica (Figuras 3.4A e B).

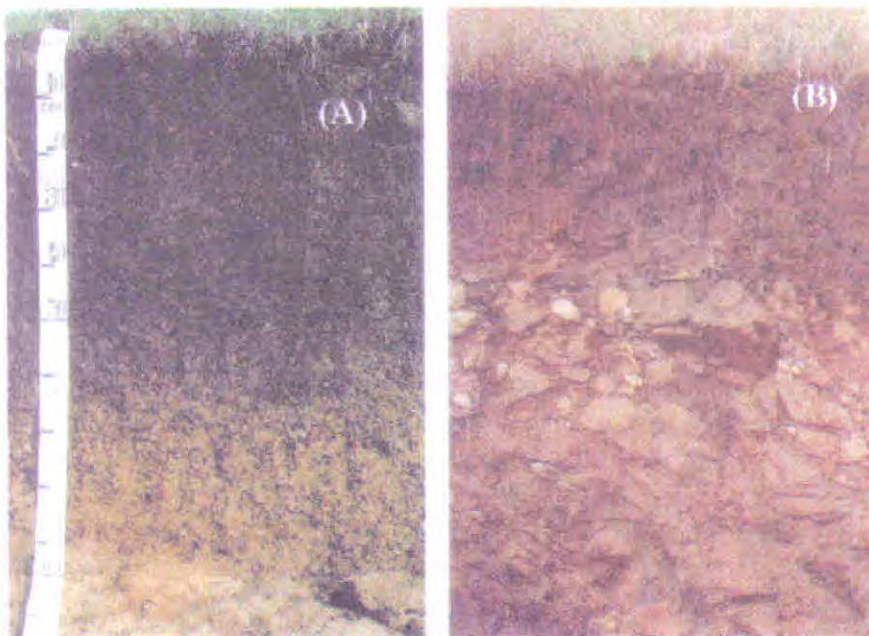


Fig.3.4 – Cambissolo Húmico (A) e Solo Litólico Húmico (B) FONTE: Oliveira et al. (1992).

É importante ressaltar que há distinção entre clima atmosférico e clima do solo, não obstante haja, entre eles, estreitas relações. Em uma mesma área fisiográfica pode ocorrer condições particulares que determinam variações no clima do solo.

A água que cai sobre um solo e não se evapora tem apenas dois caminhos a seguir, ou seja, penetrar no solo ou escorrer pela superfície. Embora quase sempre siga os dois sentidos, o relevo atua mais diretamente sobre a dinâmica da água tanto no sentido vertical como no lateral.

Solos de terrenos íngremes são submetidos constantemente ao rejuvenescimento, através dos processos erosivos naturais. De modo geral, relevos íngremes apresentam climas mais secos do que os de relevos mais suaves, onde as condições hídricas mantêm o ambiente úmido mais duradouro. Com isto, pode-se dizer que o relevo atua na formação do solo de duas maneiras, isto é, na dinâmica da água e sobre o clima do solo.

Os microrganismos atuam mais diretamente na decomposição de restos vegetais e de animais depositados no solo e na fixação do nitrogênio.

A vegetação participa nos processos de troca catiônica, nos estoques de nutrientes e na absorção

de cátions da solução do solo. Entretanto, a ação mais importante da cobertura vegetal é nos fenômenos de adição, tanto da superfície, através de resíduos, como no interior do solo mediante a decomposição do sistema radicular.

A exposição do material de origem à superfície pode ocorrer tanto por processos lentos e contínuos, como pela deposição de sedimentos nas várzeas dos rios, ou por fenômenos cataclísmicos, tais como o derrame de lavas de erupções vulcânicas. *

Com relação à idade dos solos, na Pedologia há dois termos que são comumente empregados e que têm significados diferentes, são eles: **idade do solo** e **maturidade do solo**. Idade refere-se ao tempo cronológico, enquanto que a maturidade diz respeito à evolução do solo. Alguns solos podem apresentar idades absolutas relativamente pequenas e serem bem mais maduros (evoluídos) que outros com idades maiores. Logo, **idade** expressa uma medida de anos transcorridos desde o início da formação até um determinado momento e **maturidade** expressa a evolução por ele sofrida, manifestada pelos seus atributos (atividade da argila, cor, caráter eutrófico, etc), em dado momento de sua existência.

Essa diferença é importante para a pedologia porque diante da dificuldade de conhecer a idade de um solo, os pedólogos buscam o entendimento pelo recurso da maturidade.

Da ação combinada dos fatores de formação do solo e dos processos pedogenéticos, que operam sobre o material de origem, resultam seções verticais mais ou menos paralelas à superfície compondo assim o *perfil do solo*. Essas seções (camadas) denominadas *horizontes*, diferenciam-se umas das outras pela organização, pelos constituintes ou pelo comportamento (Figura 3.5)

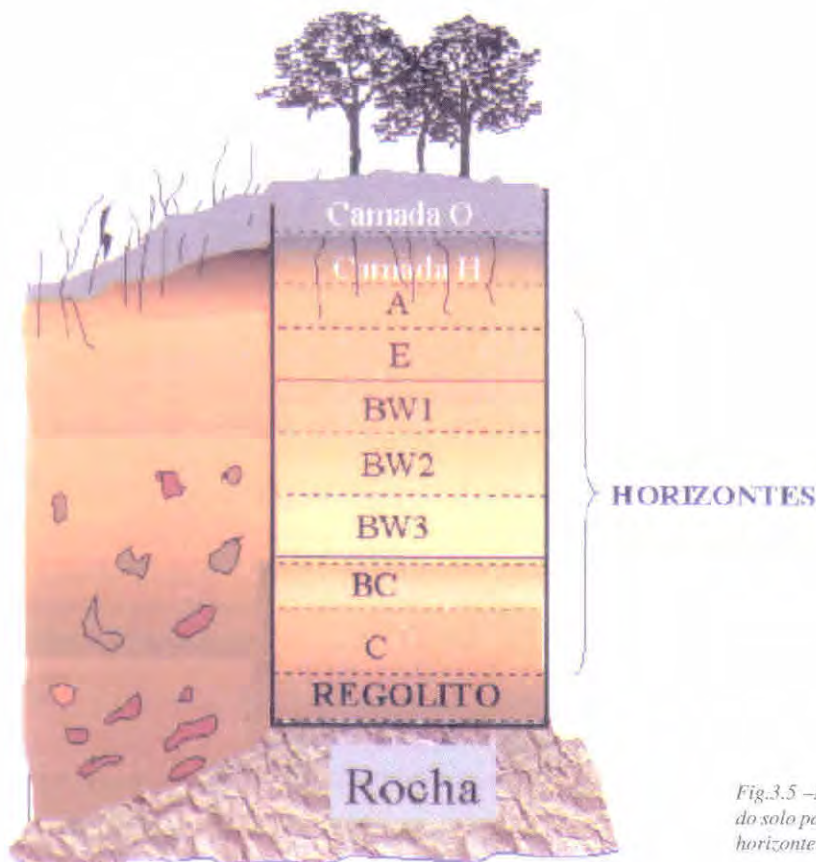


Fig.3.5 –Esquema de um corte vertical do solo para mostrar um perfil com seus horizontes e camadas.

A denominação dos horizontes e camadas é feita através de letras e números, que informam a relação genética existente entre horizontes no conjunto do perfil. Além dos símbolos, empregam-se também sufixos de símbolos adicionais para notação de diferentes modalidades dentro de um determinado horizonte. Por exemplo, se num perfil superficial de um solo aparece a simbologia **Ap**, tem-se o seguinte significado: “A” define o tipo de horizonte e o subscrito “p” designa “aração” (plow = lavra, em inglês). Neste caso, é um indicativo de modificações do horizonte A, provocado pela aração, gradagem e demais operações de manejo do solo para uso agrícola.

O conhecimento detalhado de cada um dos horizontes do solo é muito importante do ponto de vista pedológico. Entretanto, para os objetivos do sensoriamento remoto, o horizonte mais importante é o superficial, porque é nele que ocorre a reflexão da energia onde opera a maior parte dos sistemas sensores orbitais. Por sua vez, o horizonte superficial depende do grau de alteração que o solo sofreu, pela ação do ambiente ou pela ação antrópica. Para a maioria dos casos, a camada superficial do solo é formada pelos horizontes A, E ou B ou pelas camadas O ou H (orgânicos).

Quando os atributos (atividade da argila, capacidade de troca catiônica – CTC, etc) são bem diferenciados de um horizonte para outro, torna-se relativamente fácil a identificação e a delimitação dos mesmos (Figura 3.6A). Entretanto, se estes atributos não são bem diferenciados, a expressão dos horizontes é pouco distinta (Figura 3.6B).

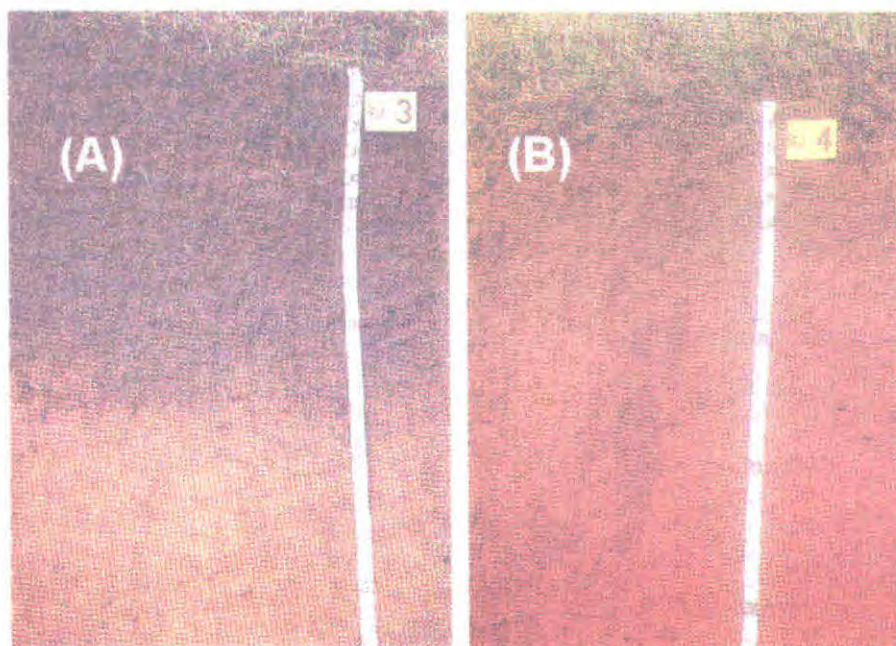


Fig.3.6– Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico Álico (A) e Podzólico Vermelho-Escuro Tb (B), Eutrófico, para mostrar as diferenças quanto à nitidez de horizontes. FONTE: Oliveira et al. (1992).

Numa situação em que toda camada superficial húmica do Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 3.6A) seja retirada, o comportamento espectral desse solo muda por completo, o que pode levar a erro de identificação, quando observado nos dados de satélite.

Como os horizontes A, E e B e as camadas O e H são os mais importantes sob o ponto de vista do sensoriamento remoto, vale a pena fazer uma descrição breve sobre cada uma delas.

Horizonte O – formado por material orgânico em condições de drenagem desimpedida (sem estagnação de água). Consiste em uma manta de acúmulos de restos orgânicos não incorporados ao solo, conhecida como serrapilheira, conforme é exemplificado na Figura 3.7.

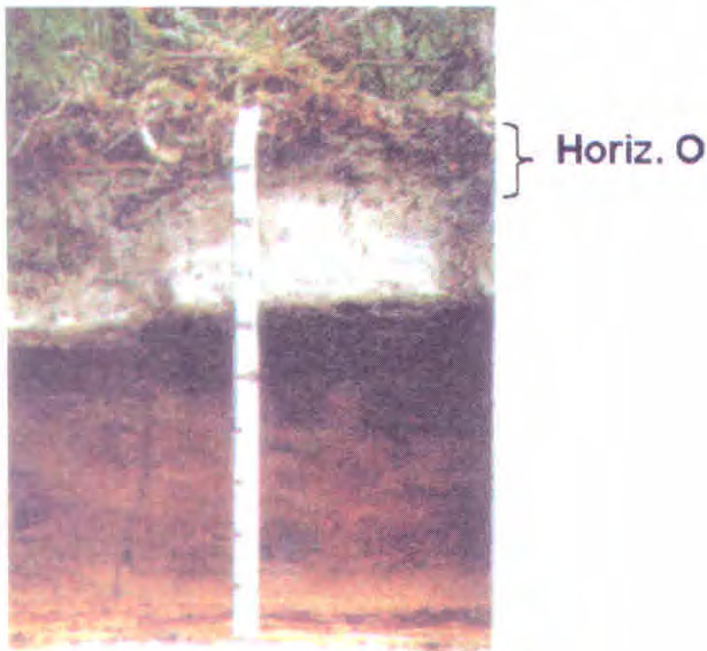


Fig. 3.7 – Perfil de um Podzólico Álico para mostrar o horizonte "O"
FONTE: Oliveira et al. (1992).

Horizonte H – Camada orgânica, superficial ou não, formada por acumulação de resíduos vegetais depositados sob condições de umidade prolongada ou permanente (estagnação de água). São encontrados em solos de várzeas, banhados e brejos, sendo as turfas um exemplo bem característico deste horizonte (Figura 3.8).



Fig.3.8 – Perfil de um Solo Orgânico, para mostrar o horizonte H (turfoso).
FONTE: Oliveira et al. (1992).

Horizonte A – horizonte mineral superficial ou subjacente aos horizontes O ou H, de maior atividade biológica e incorporação de matéria orgânica bastante mineralizada. É a porção mais viva e de mais intensa ação da flora e da fauna, responsáveis pela produção da matéria orgânica no próprio solo. Constitui a seção onde são mais inconstantes a temperatura, a umidade e a composição gasosa. Geralmente exibe cor mais escura que os horizontes subjacentes (Figura 3.9A), podendo também ser de cor clara, como é mostrado na Figura 3.9B.

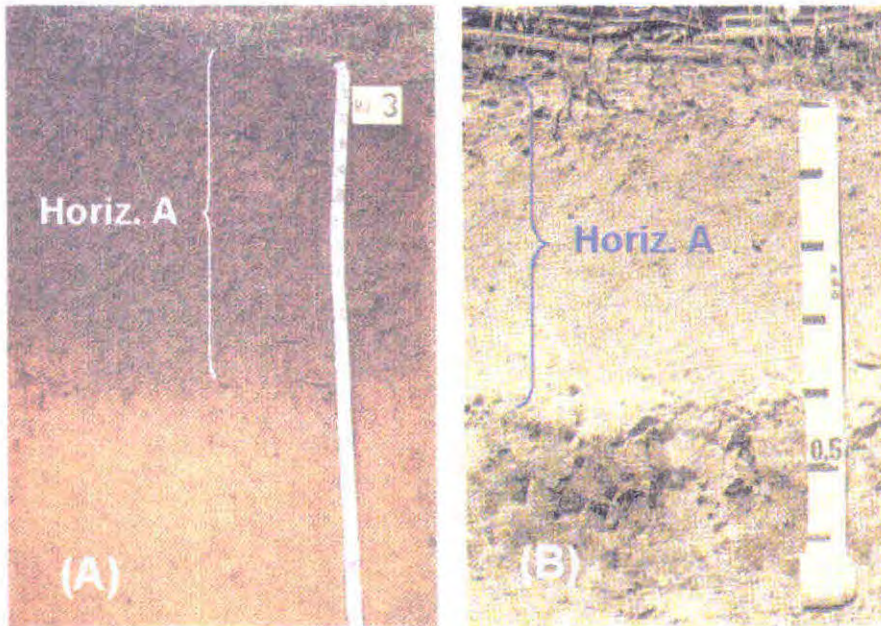


Fig. 3.9 – Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico Álico (A) e Planossolo Solódico Ta, horizonte A claro (B). FONTE: Oliveira et al. (1992).

Horizonte E – horizonte mineral, resultante da perda de minerais de argila, de compostos de ferro, de alumínio ou de matéria orgânica. Situa-se, geralmente, abaixo do horizonte A, diferenciando-se deste pela cor mais clara. Pela antiga convenção, recebia a designação de A2. É bastante típico da formação do Podzol (Figura 3.10).

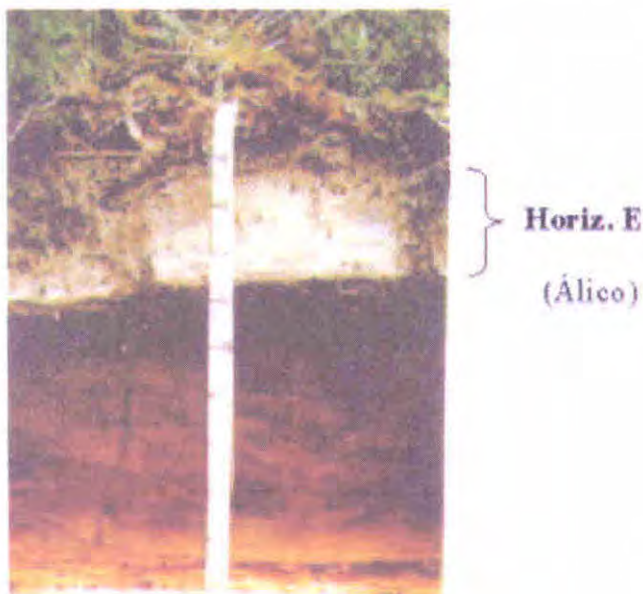


Fig. 3.10 – Perfil de um Podzol Álico, para mostrar o horizonte E álbico. FONTE: Oliveira et al. (1992).

Horizonte B – horizonte mineral, subsuperficial, situado sob os horizontes E e A, raramente sobre o H. Originado por transformações acentuadas do material originário e/ou por ganho de constituintes minerais ou orgânicos, migrados de horizontes suprajacentes, conforme é mostrado na Figura 3.11. É um horizonte menos vulnerável às modificações e eventuais estragos provocados pela ação humana, quando subjacente a outros horizontes.

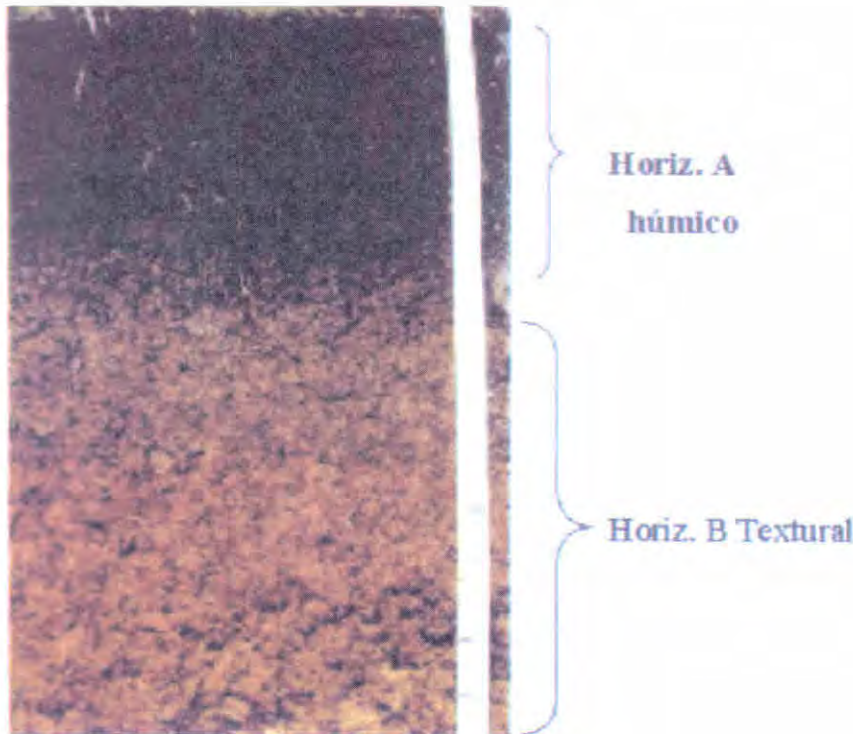


Fig. 3.11 – Rubrozem Álico, para mostrar o horizonte B abaixo do horizonte A húmico. FONTE: Oliveira et al. (1992).

Com relação ao horizonte C, a ocorrência dele como horizonte superficial, embora não seja impossível, é muito pequena quando se pensa em termos de sensoriamento remoto orbital.

3.2 Composição do Solo

Em geral, o solo tem sido considerado como sendo composto de quatro constituintes principais: partículas minerais, materiais orgânicos, água e ar, que, numa condição ideal, guardam uma relação aproximadamente de 46% de minerais, 25% de água, 25% de ar e 4% de matéria orgânica. Esta caracterização serve apenas para dar uma idéia do que se pode encontrar num determinado solo, uma vez que, devido à ação de agentes externos, estes componentes podem ocorrer em concentrações muito diferentes destas.

A rigor, os solos são compostos apenas por partículas minerais e orgânicas. Água e ar não fazem parte do solo, estão nele porque encontram uma condição (os poros) que permite a permanência no meio (Ziller, 1982). Fazendo ou não parte do solo, nesta publicação, a água e o ar foram considerados como parte deste, formando o complexo solo, uma vez que, para o sensoriamento remoto, o comportamento espectral é muito influenciado por todos os elementos deste complexo.

3.2.1 – Constituintes Minerais

As partículas minerais do solo podem ser classificadas, quanto à sua origem, em dois tipos: remanescentes da rocha que deram origem ao solo, denominados minerais primários e minerais ou produtos secundários, formados pela decomposição (minerais primários). Os minerais primários são mais resistentes à ação do intemperismo químico e, por isso, permanecem mais tempo no solo, mantendo sua composição original. Os minerais secundários são mais suscetíveis às alterações.

Os constituintes minerais do solo podem ser classificados de acordo com a sua textura, ou seja, a proporção relativa das frações granulométricas que compõem a massa do solo. Para determinações quantitativas, são arbitrados limites de intervalos conforme o diâmetro de partículas. Não há um sistema universal referencial, porém os limites mais difundidos são os da escala de Atterberg, dita como Sistema Internacional, e os da escala de uso oficial pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). No Brasil utiliza-se uma escala de limites elaborada pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos (SNLCS) e pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), conforme é mostrado na Tabela 3.1.

Segundo Oliveira et al. (1992), o que se verifica em um perfil de solo é a coexistência de diversas frações granulométricas em combinações variáveis. Assim como existem sistemas para classificar os diferentes tipos de solos, por exemplo, no Brasil temos os Latossolos, Podzólicos, Brunizéns, baseados na partícula do solo, de acordo com seu tamanho. Entre esses sistemas o mais amplamente usado no Brasil é o do Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, conforme é mostrado na Figura 3.12. Esse sistema é usado na classificação dos solos em função da textura, como textura argilosa, solos arenosos, etc. (Lemos e Santos, 1984).

Tabela 3.1 - Tamanho das partículas do solo de acordo com o sistema de classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a escala de Atterberg e o Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo (SNLCS) e Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS).

PARTÍCULA	TAMANHO (mm)		
	USDA	ATTERBERG	SNLCS E SBCS
Matacão	> 200	200	>200
Calhaus	75 – 200	20 – 200	200 a 20
Cascalho	2 – 75	2 – 20	20 a 2,0
Areia muito grossa	1 – 2	–	–
Areia grossa	0,5 – 1	0,20 – 2	2,0 a 0,2
Areia média	0,25 – 0,5	–	–
Areia fina	0,10 – 0,25	0,02 – 0,20	0,5 a 0,2
Areia muito fina	0,05 – 0,10	–	–
Silte (limo)	0,002 – 0,05	0,002 – 0,02	0,002 a 0,05
Argila	< 0,002	< 0,002	< 0,002

De modo bastante generalizado, pode-se dizer que a mineralogia da fração grosseira (silte e areia) reflete a mineralogia da rocha mãe. A fração argila, na maioria dos casos, é formada pela intemperização de minerais menos resistentes da rocha original.

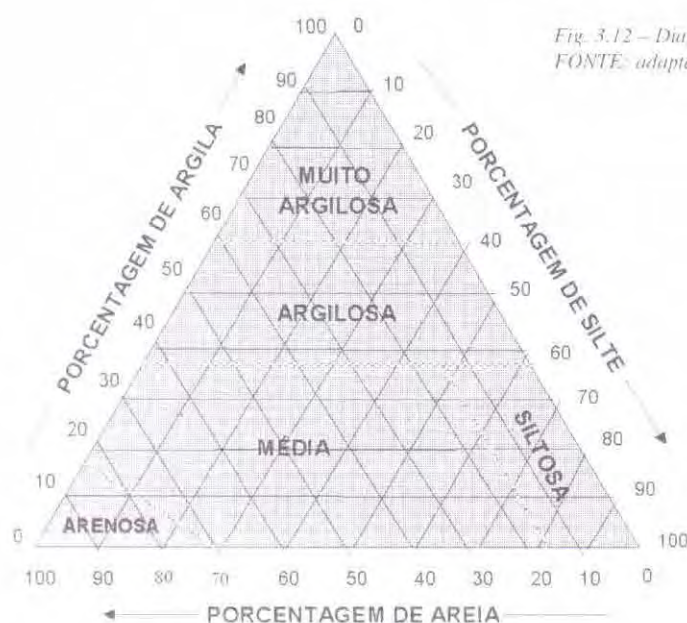


Fig. 3.12 – Diagrama de repartição de classes generalizadas de textura
 FONTE: adaptada de EMBRAPA (1979)

Para os objetivos do sensoriamento remoto, o conhecimento da textura do horizonte que se encontra na superfície é importante porque dependendo da sua granulometria, a radiação eletromagnética pode interagir com os constituintes do solo em maior ou menor intensidade. Por exemplo, se um solo apresenta, no seu horizonte superficial, uma composição de 80% de areia, 10% de silte e 10% de argila, ele é dito arenoso. Nesta situação, muito provavelmente, o solo apresenta uma alta refletividade, ou seja, grande parte da energia incidente sobre ele é refletida. Esta energia, quando captada por algum sistema sensor e transformada em produtos que possam ser analisados por métodos visuais ou automáticos, apresentará tons de cinza bastante claros, em relação a outros solos mais argilosos.

Conhecendo as relações entre textura e as propriedades do solo e as relações entre textura e comportamento espectral é possível inferir muitas propriedades do solo com base apenas na análise dos dados remotamente sensoriados. Por exemplo, num solo arenoso é possível inferir algumas características como: bem drenado, baixos teores de matéria orgânica, etc.

As argilas, por sua vez, são classificadas em dois grupos: as silicatadas, que ocorrem mais em regiões de clima temperado e as constituídas por óxidos de ferro e de alumínio, nas regiões tropicais e subtropicais.

Os óxidos de ferro e de alumínio são importantes, no caso dos solos brasileiros, porque estão presentes na classe de solo mais expressiva, em regiões tropicais, em termos de proporção, que são os Latossolos. Neste caso, as argilas mais importantes são: a Gibbsita ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), a Goetita ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) e a Limonita ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$).

3.2.2 – Material Orgânico

O teor de matéria orgânica do solo é bastante reduzido quando comparado ao material mineral. Entretanto, sua influência nas propriedades do solo e, conseqüentemente, no crescimento vegetal, tem uma grande importância. A proporção de matéria orgânica varia entre os diferentes tipos de solos. Por exemplo, em solos arenosos desérticos a matéria orgânica chega a 0,5 % do peso total. Na maior parte dos solos cultivados, o teor varia de 2 a 5% e, em alguns casos, pode chegar até 10%. Em casos extremos (solos turfosos) a matéria orgânica pode alcançar 90 a 95 % do peso total.

O húmus, resultante da intensa transformação microbiana da matéria orgânica, apresenta propriedades coloidais semelhantes às argilas e têm capacidade de troca catiônica elevada. Sua capacidade

de reter nutrientes chega a exceder em muito a das argilas (Lepsch, 1976). Além disso, a matéria orgânica imprime outras propriedades positivas aos solos, tais como: a) promove agregação (agente cimentante); b) aumenta a estrutura; c) reduz a densidade do solo; d) regula a aeração (formação de macroporos); e) diminui a macroporosidade dos solos arenosos e aumenta a dos solos argilosos, etc.

3.2.3 – Água no Solo

A *água do solo* consiste de uma solução contendo vários eletrólitos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , ...) e outros componentes. Alguns autores consideram como sendo *água do solo* a quantidade que fica fortemente retida nos colóides, portanto sem ter movimento e sem poder ser utilizada pelas plantas e, *solução do solo*, aquela porção que contém eletrólitos e pode se movimentar e ser utilizada pelas plantas.

A água penetra nos solos através dos poros, que nada mais são do que o resultado do arranjo das frações granulométricas, agregadas por agentes cimentantes. A partir deste arranjo das frações granulométricas podem-se originar dois tipos de poros: os macros e os microporos que são assim classificados em função dos seus diâmetros. Os macroporos apresentam diâmetros maiores do que 0,05 mm e os microporos diâmetros menores do que 0,05 mm.

A água que penetra no solo poderá ter diversos destinos: a) permanecer nos poros; b) ser absorvida pelas raízes das plantas e transpiradas de volta à atmosfera; c) subir pelo processo de capilaridade e ser evaporada e d) percolar através do solo para uma maior profundidade no perfil do solo, processo conhecido como drenagem profunda.

De acordo com o conteúdo e a natureza de retenção de umidade, reconhecem-se três estados de solo: molhado, úmido e seco.

Solos molhados são aqueles em que os poros estão cheios de água e o ar está praticamente ausente.

Solos úmidos contêm ar nos macroporos e água nos microporos. Segundo Lepsch (1976), os microporos funcionam como tubos capilares e, por esta razão, a água é referida como água capilar. Ela está retida no solo com tal força que consegue manter-se no solo mesmo contra a ação da gravidade.

Nem todos os solos têm a mesma capacidade de reter água, variando em função de diversas características tais como: textura, estrutura e conteúdo de matéria orgânica.

Solos arenosos e com pouco húmus têm menor capacidade de reter água do que solos argilosos ricos em húmus.

3.2.4 – Ar no Solo

Os espaços porosos do solo não preenchidos pela água são ocupados pelo ar. O ar do solo possui uma composição variável, em função da proximidade da fonte de um determinado gás. De modo geral, difere um pouco do ar atmosférico na sua constituição, mais expressivamente no teor de CO_2 , N_2 e O_2 , conforme é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição média do ar do solo e da atmosfera

Componente	Solo (%)	Atmosfera (%)
N_2	79	78
O_2	20	21
CO_2	0,25	0,03
Outros	0,75	0,97

FONTE: Reichardt (1993).

O conteúdo de oxigênio no ar do solo é menor do que no ar atmosférico, conforme pode ser observado na Tabela 3.2. Esses valores mudam com: a estação do ano, o tipo de solo, a planta cultivada, os métodos de cultivos e a atividade biológica do solo.

A porcentagem de CO_2 e O_2 do ar do solo varia com a profundidade. A porcentagem de CO_2 aumenta com a profundidade enquanto que a do O_2 diminui. Entretanto, as variações nas porcentagens do O_2 com a profundidade são maiores que as de CO_2 .

A capacidade de retenção de ar no solo pode ser aumentada pela adição de matéria orgânica, cinzas ou areia, principalmente em solos arenosos.

Com relação às estações do ano, na primavera e no outono a quantidade de ar no solo é maior do que nas outras duas pelo motivo do aumento da atuação bacteriana nestas estações.

3.3 Solos de Maior Ocorrência no Brasil

Nos itens anteriores, foi dito que um solo diferencia-se de outro por uma série de quesitos relacionados à morfologia dos horizontes e seus atributos diagnósticos. Com base nestas considerações, os solos são, então, classificados segundo uma taxonomia.

Existem vários sistemas de classificação de solos em uso atualmente. Entre outros, podemos citar a classificação russa, a francesa, a canadense, a americana e a da Organização para a Agricultura e Alimentos das Nações Unidas (FAO). O Brasil também tem uma classificação de solos, que é uma adaptação de outras de vários países, principalmente, da americana "Soil Taxonomy".

Com base nestes critérios, Oliveira et al. (1992) relatam a existência de 36 classes de solos em alto nível categórico de ocorrência no Brasil, que recebem denominações próprias, como por exemplo, Podzólicos, Cambissolos, etc. Essas denominações, traduzem as propriedades dos solos segundo a morfologia dos horizontes e seus atributos diagnósticos. Assim, quando se diz que um solo pertence à classe de Areias Quartzosas, é possível fazer uma série de inferências sobre este solo. Em outras palavras, a terminologia está associada às propriedades do solo.

Apesar da existência dessas 36 classes, algumas são pouco representativas em termos de área. Os solos de maior ocorrência concentram-se, basicamente, nas seguintes classes: os Latossolos ($\pm 50\%$ dos solos); Podzólico Vermelho Amarelo (24% dos solos); Vertissolos e a Terra Roxa Estruturada. No contexto do sensoriamento remoto, pode-se também destacar os solos Orgânicos, os Gleis Húmicos e os Gleis Pouco Húmicos, devido à influência desses solos no comportamento espectral. Ainda dentro do contexto do sensoriamento remoto, é importante que o especialista tenha uma noção básica sobre cada um dos solos citados, bem como a distribuição espacial de cada um deles. Para tal, todas as informações contidas nos itens subsequentes foram extraídas de Oliveira et al. (1992).

3.3.1 – Latossolos

São solos minerais de coloração vermelha, alaranjada ou amarela. As características morfológicas mais marcantes são a grande profundidade (mais de dois metros), porosidade e a pequena diferenciação entre horizontes, sendo solos com altos teores de ferro e alumínio. A grande quantidade de poros proporciona a estes solos altas permeabilidades, mesmo quando os teores de argila são elevados.

Os Latossolos formam-se em ambiente com intensa umidade e calor. Daí serem encontrados em regiões de clima tropical úmido. São solos bastante envelhecidos, estáveis e intemperizados. Esta classe subdivide-se em sete grandes grupos com diferentes teores de óxido de ferro: Latossolo Ferrífero, Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Variação Uma e Latossolo Bruno. O óxido de ferro é um elemento muito importante do ponto de vista do sensoriamento remoto, por absorver bastante a radiação eletromagnética na região do infravermelho próximo, tendo o seu pico máximo de absorção perto de 900 nm. A seguir serão descritas as principais características de cada um desses grupos.

3.3.1.1 – Latossolo Ferrífero

Apresenta coloração vermelho-púrpura, textura argilosa a muito argilosa, bastante rico em óxido de ferro (Fe_2O_3) é freqüente encontrar nestes solos valores maiores que 50 a 60% de Fe_2O_3 . São solos muito pobres quimicamente e são encontrados na região do Quadrilátero Ferrífero, ao sul e leste de Belo Horizonte. É provável que ocorram em outras regiões onde existem rochas com altos teores de ferro, como em Carajás e sul do Pará.

3.3.1.2 – Latossolo Roxo

Solos com coloração vermelho-escuro de tonalidade arroxeada, derivados de rochas básicas, com teores elevados de óxido de ferro que variam de 18 a 40 %. Os Latossolos Roxos são bastante porosos, apesar de serem argilosos a muito argilosos. A porosidade total é da ordem de 50%. São profundos, porosos, bem permeáveis mesmo quando argilosos.

A classe Latossolo Roxo é formada por solos de grande significado agrícola. Estão situados em relevo normalmente suave ondulado, com declividade que raramente ultrapassa a 7%. São encontrados em grandes áreas que se estendem desde o Sudoeste Goiano, passando pelo Triângulo Mineiro e continuando por São Paulo e estados da região Sul (EMBRAPA, 1981). Destacam-se, também, no Mato Grosso do Sul, a extensa área que se prolonga desde o norte de Campo Grande até perto de Amambai.

3.3.1.3 – Latossolo Vermelho-Escuro

São solos de coloração vermelho-escuro, vermelha ou bruno-avermelhado-escuro. Com teores de óxido de ferro inferior a 18% quando argilosos ou muito argilosos, e usualmente, inferiores a 8% quando de textura média. A textura varia desde média até muito argilosa. São solos muito profundos, bem drenados, mas podem sofrer drenagem moderada até imperfeita.

Ocupam grandes extensões do território brasileiro, em condições de relevo pouco movimentado, por isso constituem uma das classes mais importantes de solos. Ocorrem em extensivas áreas que se distribuem especialmente ao sul do paralelo 14 e a oeste da coordenada 44 WG. São encontrados nos Estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e todos os outros estados do Sul (EMBRAPA, 1981).

3.3.1.4 – Latossolo Vermelho-Amarelo

Os Latossolos Vermelho-Amarelo são profundos ou muito profundos, apresentando boa distinção entre os horizontes A e B, devido à distinção de cor, que no horizonte B é menos vermelha. Apresentam teores de óxido de ferro menores ou iguais a 11%, geralmente maiores do que 7%, quando a textura for argilosa ou muito argilosa. São normalmente porosos, mesmo aqueles com teores elevados de argila. A textura é muito variada havendo registro de teores de argila desde 15% a mais de 80%. Ocorrem em todo território brasileiro. Em alguns estados são, relativamente, pouco expressivos tais como: Rio Grande do Sul e estados nordestinos, com exceção da Bahia. No restante, ocupam áreas importantes, relacionadas às superfícies antigas e estáveis da paisagem.

3.3.1.5 – Latossolo Amarelo

São solos derivados de sedimentos arenosos ou argilo-arenosos do Grupo Barreira ou de material de cobertura relacionado aqueles sedimentos. A textura varia de franco-arenosa até muito argilosa, com valores extremos de 15% a 93% de argila. Os Latossolos Amarelos típicos apresentam-se coesos, duros ou muito duro, quimicamente pobres, com teores maiores de bases concentrados apenas na

superfície, devido à reciclagem de nutrientes. Possuem baixos teores de óxidos de ferro, na grande maioria são menores que 7% e coloração amarela (bruno-amarelo a bruno forte). O teor de carbono no horizonte superficial, mesmo nos solos argilosos sob mata, raramente se eleva acima de 1,5%, sendo comum um índice ao redor de 1% (Oliveira et al., 1992). São solos cuja fração argila é constituída essencialmente por caulinita (Sombroek, 1966).

Os Latossolos Amarelos ocorrem em relevo plano e, com menos freqüência, em relevo suave ondulado. São solos profundos, com boa drenagem, mas com limitações referentes à permeabilidade e infiltração geralmente lentas devido, sobretudo, ao adensamento. Apresentam erodibilidade tanto mais acentuada quanto mais desnudo for o solo.

Estes solos ocupam grandes extensões no Baixo Amazonas e tem importante distribuição nas zonas úmidas costeiras do Nordeste, do Sul da Bahia, do Norte do Espírito Santo e do Norte do Rio de Janeiro (EMBRAPA, 1981).

3.3.1.6 – Latossolo Variação Una

Segundo Oliveira et al. (1992), esta classe foi criada para abrigar os Latossolos com médio a altos teores de ferro e cores amareladas a alaranjadas, os quais não se enquadram na conceituação dos demais Latossolos. Foi constatado pela primeira vez na zona sul da Bahia, mas sua conceituação só veio a ser estabelecida na publicação de levantamento do solo daquele Estado no ano de 1977 (EMBRAPA, 1977).

O Latossolo Variação Una são argilosos a muito argilosos, com média à alta porcentagem de óxido de ferro, variando de 11 a 30%. Suas características mais importantes prendem-se à cor amarela a alaranjada e ao teor de óxido de ferro.

Apresentam como limitações a baixa fertilidade e a acidez elevada e, em algumas áreas, o relevo acidentado. Apesar da baixa fertilidade, as condições físicas relacionadas com retenção de umidade, consistência, permeabilidade, porosidade são boas.

Estes solos são encontrados em áreas mais significativas no sul da Bahia, na região litorânea que se estende desde Valença até Itabuna e Venceslau Guimarães a oeste (Oliveira et al., 1992). Em Minas Gerais são encontrados na região do Alto do Paranaíba, Presidente Olegário, São Gotardo, Araxá e sudoeste da Zona da Mata. Em extensões reduzidas podem ser encontrados na bacia do Ribeira do Iguape e ao norte na região de Guaíra, em São Paulo. Além disso são conhecidos no norte do Rio de Janeiro e no Espírito Santo.

3.3.1.7- Latossolo Bruno

É uma classe de solos minerais não-hidromórficos, argilosos a muito argilosos, com horizonte A rico em matéria orgânica. Nesta classe, predominam solos muito argilosos, sendo muito freqüente encontrar teores de argila próximos a 80%. Mas apesar disso são porosos. O teor de óxido de ferro é também elevado, geralmente superior a 15%, quando se trata de solos desenvolvidos de rochas básicas. Nestes solos os teores de carbono são de 4% ou mais. Às vezes, o horizonte A, apesar de rico em carbono, não apresenta a cor escura, quando úmido.

Estes solos ocorrem, geralmente, em planaltos serranos, em altitudes acima de 800 metros. Informações da EMBRAPA (1981) indicam que estes solos ocorrem principalmente em áreas elevadas dos planaltos sulinos: regiões dos Campos de Cima da Serra (RS), Campos de Lajes e de Curitibaanos (SC) e Planaltos de Guarapuava e Palmas (PR). Podem ser, ainda, encontrados no Planalto de Poços de Caldas (MG), em menor expressão.

3.3.2 – Terra Roxa Estruturada

Consiste de solos minerais de coloração vermelho-escuro, são solos argilosos a muito argilosos, derivados de rochas básicas ou ultrabásicas, com teores de óxidos de ferro relativamente elevados, em torno de 15%. Apesar de apresentarem teores altos de argila, são solos bem porosos, sendo comuns valores da porosidade total superiores a 50%. Constituem uma classe de solos de grande importância agrônômica.

São encontrados em extensas áreas nos planaltos basálticos que se estendem desde São Paulo até o Rio Grande do Sul (EMBRAPA, 1981). Além dessas ocorrências, podem ser encontrados, em menor escala espacial, na região de Ceres-GO, em Araguatins, no extremo norte de Tocantins e em Tocantinópolis-MA. Áreas pouco extensas são também encontradas na Amazônia, como por exemplo em Altamira (PA).

3.3.3 – Podzólico Vermelho - Amarelo

São solos minerais não-hidromórficos, de coloração vermelha a amarelada e teores de óxidos de ferro inferiores a 11%. Os Podzólicos Vermelho-Amarelos têm as mais variadas profundidades e texturas, inclusive com a presença ou não de cascalho e calhaus.

A grande diversidade de atributos de interesse agrônômico, tais como: profundidade, textura, eutrofismo, distrofismo, saturação por base, saturação por alumínio, atividade da argila e a ocorrência nos mais variados relevos, torna difícil uma caracterização generalizada para a classe como um todo. Pedregosidade e textura cascalhenta ocorrem geralmente em condições de relevo acidentado, onde os solos são mais susceptíveis à erosão.

Os Podzólicos Vermelho-Amarelos constituem, junto com os Latossolos Vermelho-Amarelos, as classes de solos mais comuns no Brasil. Ocorrem desde o Rio Grande do Sul até o Amapá e do Acre até Pernambuco. Habitualmente ocupam, em relação aos Latossolos, terrenos de relevos mais dissecados.

3.3.4 – Solos Orgânicos

São solos de constituição orgânica de ocorrência em ambientes hidromórficos, exceto se drenados. Apresentam nos primeiros 40 cm superficiais uma ou duas camadas de constituição orgânica, ou seja, material com teor de carbono maior do que a relação $[C(\%) = 8 + 0,067 \times (\% \text{ argila})]$. Apresentam coloração escura ou preta. É comum ocorrer uma camada Glei de cor cinza, sendo a textura argilosa a mais comum.

Os solos orgânicos são muito encontrados nas posições mais baixas e mal drenadas das várzeas. Ocorrem com relativa expressividade entre a cidade de São Paulo e Moji das Cruzes e no Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo. Ao longo da região litorânea do Sul do Brasil é comum sua presença em áreas onde houve represamento de águas pelas restingas.

3.3.5 – Glei Húmico e Glei Pouco Húmico

Essas duas classes de solos são também caracterizadas pela presença de material orgânico na superfície. Entretanto, diferem da classe de Solos Orgânicos por apresentarem menores quantidades deste material. Por esta razão, são classificados como solos minerais com elevado teor de carbono, diferentemente dos Solos Orgânicos, que são classificados como solos de constituição orgânica.

São solos desenvolvidos também em várzeas, áreas deprimidas, planícies aluvionais vinculadas ao excesso de água (Brasil, 1969). Estes solos apresentam sérias limitações ao uso agrícola, devido ao elevado lençol freático e risco de inundações ou alagamentos frequentes.

Ocorrem indiscriminadamente por todas as zonas úmidas do território brasileiro (EMBRAPA, 1981). As ocorrências mais expressivas estão relacionadas às várzeas na Planície Amazônica,

principalmente, no Baixo Amazonas e seus principais tributários e na Ilha de Marajó.

O quadro 1, contido no final deste capítulo, traz uma atualização da nomenclatura dos solos descritos com base em EMBRAPA (1999).

3.4 Interação da Radiação Eletromagnética com os Constituintes do Solo

A interação da radiação eletromagnética (REM) com os alvos da superfície da terra, inclusive com os constituintes do solo, dá-se em nível microscópico. Entretanto, antes de discutir a influência dos parâmetros do solo na quantidade de radiação eletromagnética que é refletida pelo mesmo, é necessário que se discuta a natureza da interação energia-matéria. Vale ressaltar que a maior parte das discussões aqui apresentadas foi embasada na revisão bibliográfica contida em Epíphanio et al. (1992).

Toda matéria existente no Universo é constituída de moléculas, que por sua vez, são compostas de dois ou mais átomos de elementos químicos. Os átomos são constituídos por duas partes distintas: o núcleo (contendo prótons, nêutrons, etc) e a eletrosfera que, segundo o postulado de Bohr, sobre modelo atômico, é dividida em regiões, denominadas níveis de energia ou camadas, que contêm os elétrons.

Os níveis variam de 1 a 7, dependendo do átomo, e são codificados pelas letras do alfabeto: K, L, M, N, O, P e Q, sendo o nível mais próximo do núcleo designado pela letra K. Estas camadas podem ser ainda subdivididas em subníveis de energia, que variam de 1 a 4, identificados também por letras. A subcamada de uma determinada camada, que está mais próxima do núcleo é rotulada pela letra "s" e as demais são identificadas pelas letras "p", "d" e "f". A razão da divisão em camadas e da subdivisão está relacionada ao número de elétrons que uma camada pode comportar. Na Figura 3.13 é mostrado o esquema de um átomo com destaque para os subníveis "s" "p" "d" e "f", e na Tabela 3.3 o número máximo de elétrons em cada um dos níveis.

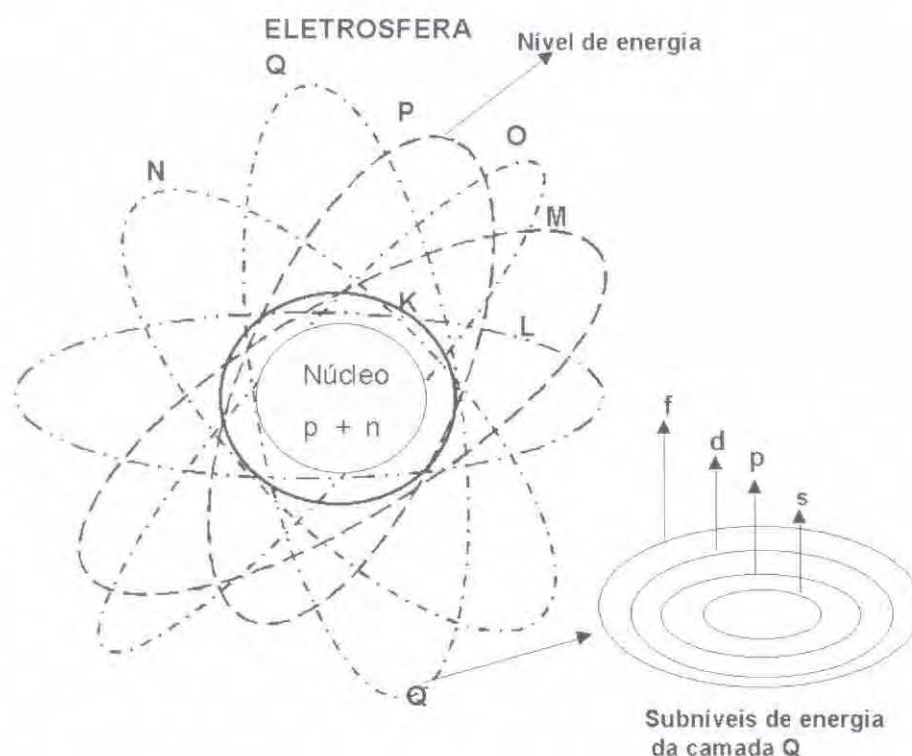


Fig.3.13 – Esquema de um átomo, para mostrar os níveis e os subníveis de energia.

Tabela 3.3 – Níveis energéticos, subníveis e número máximo de elétrons em um nível energético do átomo

CAMADA	Nível	Subníveis	Número máximo de elétrons
K	1	s ² *	2
L	2	s ² p ⁶	8
M	3	s ² p ⁶ d ¹⁰	18
N	4	s ² p ⁶ d ¹⁰ f ¹⁴	32
O	5	s ² p ⁶ d ¹⁰ f ¹⁴	32
P	6	s ² p ⁶ d ¹⁰	18
Q	7	s ²	2

* Indica o número máximo de elétrons na subcamada ou subnível

Quando a radiação eletromagnética incide sobre a matéria os elétrons dos elementos que a constituem absorvem essa radiação de forma seletiva, ou seja, em determinados comprimentos de ondas. Isto porque os elétrons são “presos” ao núcleo com forças diferentes, dependendo em qual nível e subnível de energia se encontrem. Quanto mais afastado do núcleo estiver o elétron, maior é a energia gasta para manter este elétron girando em torno do núcleo. Por isso, na medida em que ele se afasta do núcleo aumenta o nível de energia.

A radiação absorvida é capaz de provocar uma mudança no estado atômico, isto é, o elétron absorve determinados **quanta** de energia (Teoria de Planck) e salta para uma camada eletrônica mais afastada do núcleo, ou seja, mais energética. Neste caso, o átomo passa de seu estado fundamental (estável) para o estado excitado. Entretanto, certas radiações, em determinados comprimentos de onda, que são absorvidas pelos elétrons ou pela molécula, não provocam mudança de estado atômico, apenas provocam um movimento vibracional. Neste caso, a energia é dita vibracional.

Segundo Madeira Netto (1991), as energias necessárias para as transições eletrônicas, isto é, para fazer com que os elétrons mudem o estado energético, compreendem aquelas de comprimento de onda contidas na faixa espectral do ultravioleta ao infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Por outro lado, a energia absorvida que provoca apenas vibração no elétron e, conseqüentemente, na molécula, corresponde àquela contida na faixa espectral do infravermelho médio do espectro eletromagnético.

Segundo Cervelle (1988), há três tipos principais de absorção que resultam em excitação dos elétrons:

3.4.1 – Transição Intra-Atômica

A transição intra-atômica ocorre no interior do átomo do átomo devido à ação de um campo cristalino. Por este processo o átomo absorve energia e faz com que o elétron mude de nível de energético. O campo cristalino, segundo Epiphânio et al. (1992), é criado pelas cargas negativas dos ânions e de grupos dipolares (“ligantes”) ao redor dos íons. A mudança energética de um elétron que se encontra no subnível “d” (por exemplo, elementos químicos da coluna 1B a 8B da tabela periódica “transição”) e no subnível “f” (série dos Lantanídeos e Octanídeos “terras raras”) faz-se com absorção de energia eletromagnética correspondentes aos comprimentos da onda do ultravioleta ao infravermelho próximo.

Os *terras raras* são elementos de ocorrência muito limitada nos solos. Por esta razão, exercem muito pouca influência na absorção da radiação eletromagnética. Deste modo, a absorção da energia dá-se por outros elementos químicos. Entre os elementos de transição, o ferro é o mais comum nos solos, em particular, nos Latossolos. Por esta razão, a radiação eletromagnética absorvida nesta faixa do espectro eletromagnético, pelos constituintes do solo é, em grande parte, devida à presença dos óxidos de ferro.

A localização da energia absorvida nesta faixa espectral depende da valência do íon (Fe^{2+} ou Fe^{3+}), da coordenação (tetraédrica ou octaédrica) e da natureza dos íons que se ligam ao ferro para formar a molécula (O^{2-} , SO_4^{2-} , etc).

3.4.2 – Transferência de Carga ou Transições Inter-Elementos

Refere-se ao processo no qual a energia é absorvida pela transferência de elétrons entre íons adjacentes, isto é, nas ligações químicas para formar um composto, por exemplo, o cloreto de sódio (NaCl). O sódio que tem um elétron na última camada (neste caso a camada M) cede ao cloro que tem sete elétrons na última camada. Essas transferências de cargas são feitas através da absorção de energia eletromagnética centrada no ultravioleta. Nos espectros de solo, segundo Epiphanyo et al. (1992), os processos de transferências de cargas são postos em evidência pelo aumento progressivo da intensidade da reflectância do visível em direção ao infravermelho.

3.4.3 – Transições da Banda de Valência à Banda de Transição

Para os metais (coluna 1 e 2 da tabela periódica de Mendeleiev) há níveis de energia ou camadas vazios e próximos uns dos outros que estão, igualmente, próximos aos níveis de energia contendo elétrons. Uma vez que o elétron de um nível é transferido para um desses níveis vazios, o elétron torna-se deslocalizado e completamente livre. Isto se faz através do fornecimento de energia. Para os elementos semicondutores, entre os quais alguns óxidos metálicos como a magnetita e a ilmenita, as bandas (camadas orbitais) completas com elétrons e as vazias são separadas por um certo intervalo de nível energético. Esse intervalo com nível de energia inferior aos níveis de energia do visível e infravermelho é o responsável por bandas intensas de absorção metálica ao longo do espectro eletromagnético.

3.4.4 – Absorção de Origem Molecular

A absorção da energia eletromagnética pode ser de origem atômica, conforme discutido nos itens anteriores, ou de origem molecular. Quando a energia é absorvida em nível molecular, ela apenas provoca o fenômeno de vibração da molécula, ou seja, não há uma transferência de energia, como no caso das transições atômicas. Essa vibração consiste em oscilações de átomos da molécula e, também, de seu centro de equilíbrio. A energia necessária para este fenômeno situa-se na região espectral do infravermelho médio.

As vibrações de grupos OH^- , SO_4^{2-} e CO_3^{2-} , freqüentes nos solos, são bons exemplos de absorções de origem molecular. Para os Latossolos, os eventos espectrais ligados às hidroxilas (OH^-) são particularmente importantes pois os radicais OH^- participam da rede da caulinita e da gibbsita, dois componentes maiores destes solos (Epiphanyo et al., 1992).

3.5 Parâmetros que Influenciam a Reflectância dos Solos

Os parâmetros do solo que influenciam na radiação refletida pela superfície são vários, porém, a literatura cita como mais importantes: os óxidos de ferro, a umidade, a matéria orgânica, a granulometria, a mineralogia da argila e o material de origem. Além desses fatores, têm sido citados: a cor do solo, a capacidade de troca catiônica, as condições de drenagem interna do solo, a temperatura, a localização, etc.

A rigor, a quantidade de energia refletida por um determinado tipo de solo é função de todos esses fatores que, conjuntamente, se encontram no solo. Em determinadas condições a influência de um parâmetro, na energia refletida pelo solo, sobrepuja a dos outros, resultando, assim, num espectro característico daquele parâmetro.

3.5.1 – Óxidos de Ferro

Os óxidos de ferro, dependendo do tipo e da quantidade relativa, influenciam a cor dos solos, isto é, dão aos solos a cor correspondente ao óxido. Por exemplo, solos que contêm quantidades apreciáveis de ilmenita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) apresentam coloração amarelo-clara, porque é a cor manifestada pela ilmenita. Solos ricos em hematita (Fe_2O_3) são de coloração vermelha, por causa da cor da hematita, conforme é mostrado na Figura 3.14.

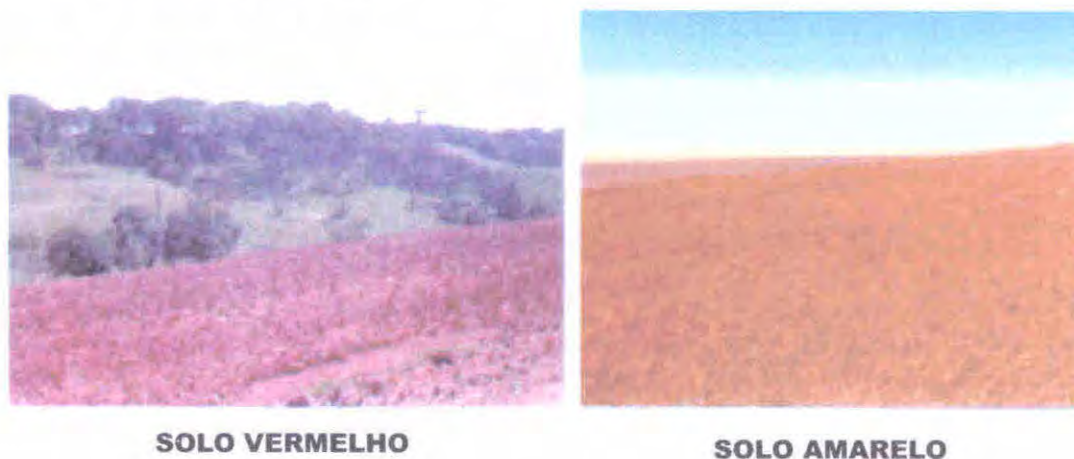


Fig. 3.14 – Solos com coloração vermelha e amarela.

No contexto de sensoriamento remoto, a reflectância espectral de solos pode ser usada como um critério importante na identificação de solos que contêm diferentes óxidos de ferro. Em geral, os óxidos de ferro absorvem bastante a energia eletromagnética da região do infravermelho próximo (com máximo de absorção em torno de 900 nm). A quantidade de energia absorvida depende da quantidade do óxido de ferro. Assim, para solos contendo maiores teores de óxidos de ferro, como os Latossolos Ferríferos e os Latossolos Roxos, os espectros de energia refletida, principalmente, na região do infravermelho próximo, são bastante atenuados em razão da presença do óxido de ferro, que sobrepuja as influências dos demais parâmetros do solo.

De acordo com a descrição das classes, o Latossolo Ferrífero e o Latossolo Roxo possuem altos teores de óxido de ferro e coloração bastante semelhantes. Isto em termos de resposta espectral pode ser um fator complicativo, devido às altas percentagens de óxidos de ferro. Entretanto, espera-se que o Latossolo Ferrífero tenha um espectro de absorção maior do que o Latossolo Roxo, por apresentar maior percentual de óxido de ferro. Porém, é preciso estar atento à amplitude de variação do óxido de ferro que é muito grande, podendo ocorrer casos em que os dois tipos de solos apresentem valores semelhantes.

Os sesquióxidos, típicos de regiões intensamente intemperizadas como os trópicos, apresentam espectros de reflectância dominados por feições devidas ao ferro. A hematita (Fe_2O_3), limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e goetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), constituintes dos solos tropicais, apresentam bandas de absorção bem definidas próximas de 900 nm. Entretanto, quando no solo há presença de magnetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$), em geral, ocorrem baixas reflectâncias no visível, no infravermelho próximo e médio, sem feições de absorção (Epiphanyo et al., 1992).

Montgomery (1976) observou que o teor de óxido de ferro livre no solo foi significativo na reflectância tanto no visível como no infravermelho e que a significância aumentou com o aumento do comprimento de onda. Porém, segundo Montgomery (1976), devido à pequena banda de absorção

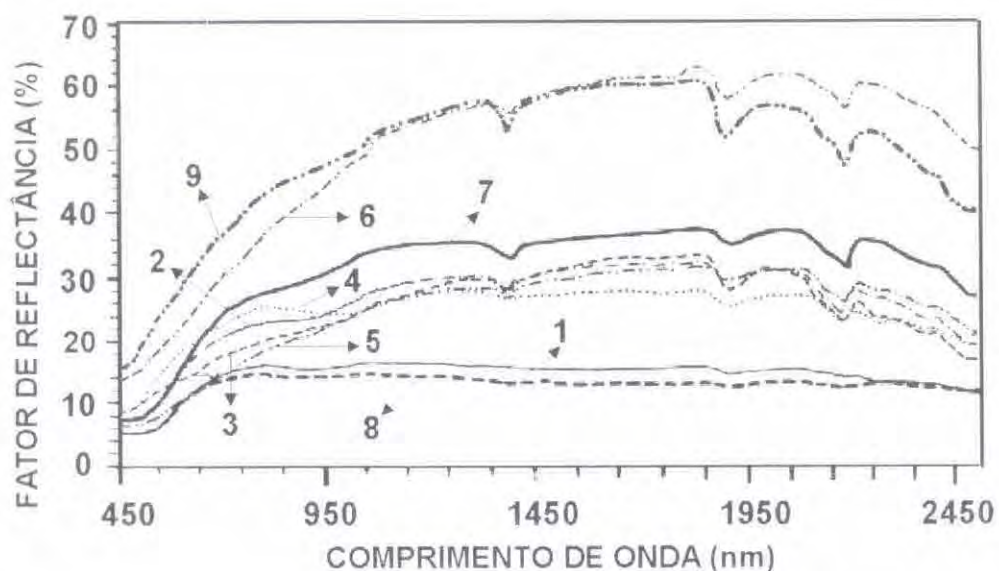
do ferro (em torno de 900 nm) e às largas bandas do sensor TM, podem tornar-se impraticáveis as comparações de reflectâncias em solos com diferentes níveis de óxidos de ferro, utilizando dados do Landsat. Ou seja, seria necessário dispor de sistemas sensores orbitais que operassem em bandas espectrais mais estreitas no infravermelho próximo.

Por outro lado, o autor observou ainda que a presença da matéria orgânica não diminuiu a contribuição do ferro na reflectância do solo.

Para ilustrar o que foi dito nos dois últimos parágrafos, a respeito de variação dos teores de óxido de ferro, em diferentes tipos de solos, na Tabela 3.4, estão contidas as percentagens do Fe_2O_3 obtidas em amostras de diferentes solos do Estado de São Paulo e na Figura 3.15 e 3.16 são mostrados as curvas de reflectância obtidas para estas amostras nos horizontes A e B.

Tabela 3.4 - Classes de solo do Estado de São Paulo e porcentagens de óxido de ferro (Fe_2O_3)

N	CLASSE DE SOLO	Teor de Fe_2O_3 (%) *	
		HORIZONTE A	HORIZONTE B
1	Latossolo Roxo (LR)	21,3	23,5
2	Latossolo Vermelho-Escuro (LE)	8,3	9,6
3	Latossolo Vermelho-Amarelo (LA)	5,9	8,1
4	Latossolo Una (LU)	7,0	9,3
5	Latossolo Húmico (LH)	3,6	4,4
6	Podzólico Vermelho-Amarelo (PA)	0,3	1,0
7	Podzólico Vermelho-Escuro (PE)	3,6	5,9
8	Terra Roxa Estruturada (TE)	25,6	23,4
9	Cambilssolo (Cb)	2,1	2,1



*Fig. 3.15 - Curvas de reflectância do horizonte A, para os solos contidos na Tabela 3.4.
FONTE: Adaptada de Epiphânio et al. (1992).*

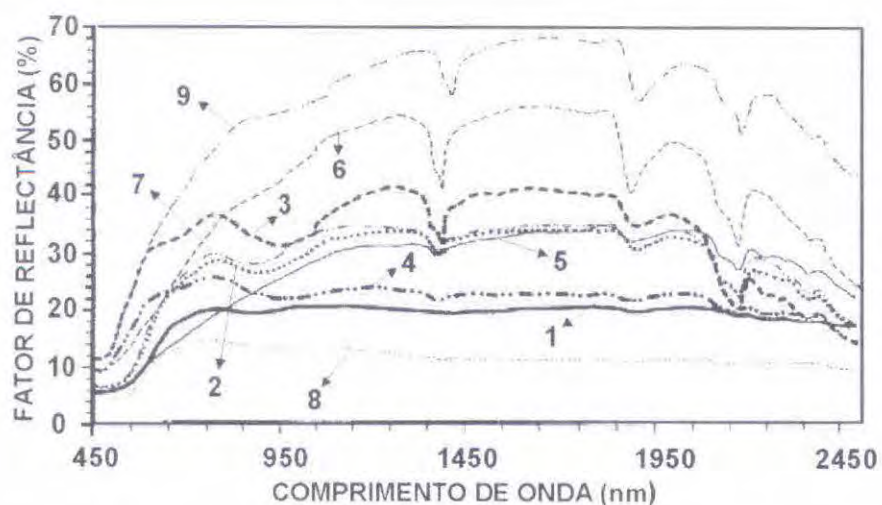


Fig. 3.16 - Curvas de reflectância do horizonte B, para os solos contidos na Tabela 3.4. FONTE: Adaptado de Epiphany et al. (1992).

A seguir, utilizando os dados de Epiphany et al. (1992), foram agrupadas curvas espectrais, de amostras de diferentes tipos de solos de uma mesma classe, para se ter uma idéia da variabilidade dessas curvas em função da percentagem de óxidos de ferro, conforme são mostrados nas Figura 3.17 a 3.21. Os valores das porcentagens de óxido de ferro, de carbono orgânico e de argila são mostrados nas Tabelas 3.5 a 3. 9.

Tabela 3.5 - Percentagens de Fe_2O_3 , carbono orgânico (C) e argila no horizonte superficial de SEIS solos da classe Latossolo Vermelho-Escuro (LE), do Estado de São Paulo.

Solo *	Fe_2O_3 (%)	C %	Argila (%)
1	8.3	2.4	60
2	6.8	1.7	37
3	10.4	1.1	41
4	11.3	1.8	46
5	5.5	0.8	21
6	2.7	0.7	19

* Adaptada de Epiphany et al. (1992)

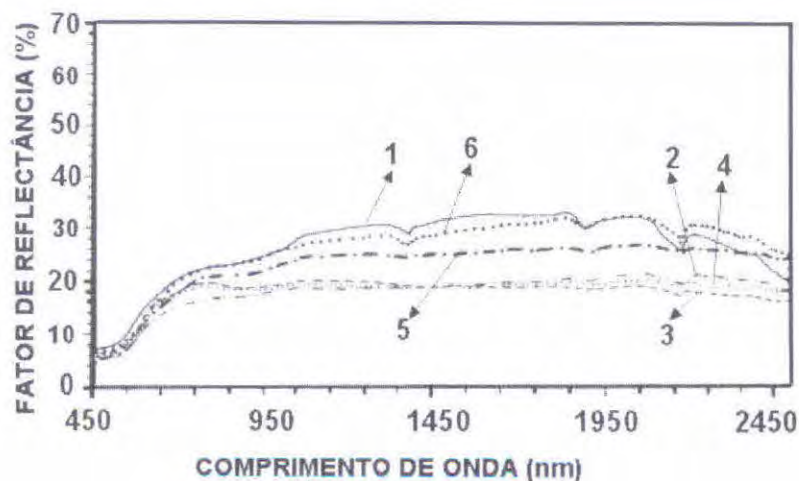


Fig. 3.17 - Curvas espectrais para diferentes amostras de solos Latossolos Vermelho-Escuros descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.6 - Percentagens de Fe_2O_3 , carbono orgânico (C) e argila no horizonte superficial de quatro solos da classe Latossolo Vermelho-Amarelo (LA), do Estado de São Paulo.

Solo *	Fe_2O_3 (%)	C %	Argila (%)
1	5.9	5.1	70
2	5.3	1.0	31
3	2.1	1.2	14
4	7.1	1.2	30

* Adaptada de Epiphânio et al. (1992).

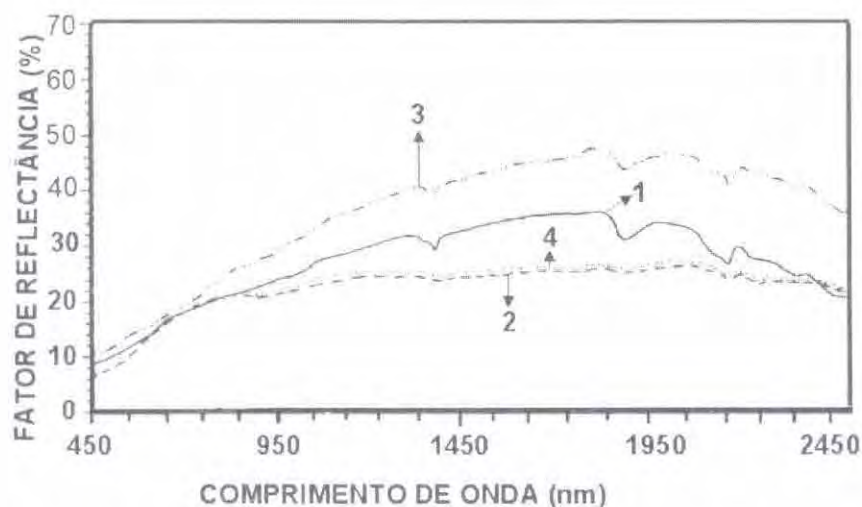


Fig. 3.18 - Curvas espectrais para diferentes amostras de solos contidas na Tabela 3.6 para a classe Latossolo Vermelho-Amarelo.

Tabela 3.7 - Percentagens de Fe_2O_3 , carbono orgânico (C) e argila no horizonte superficial de quatro solos da classe Latossolo Una (LU), do Estado de São Paulo.

Solo *	Fe_2O_3 (%)	C %	Argila (%)
1	18.9	3.0	58
2	7.0	1.8	30
3	13.9	55.0	52
4	4.3	1.0	23

* Adaptada de Epiphânio et al. (1992).

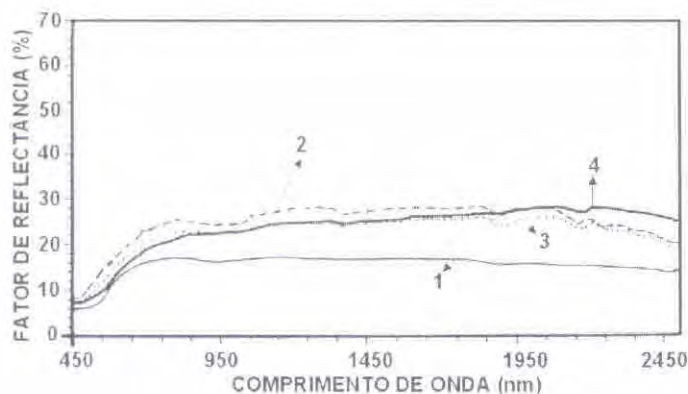


Fig. 3.19 - Curvas espectrais de amostras de solos contidas na Tabela 3.7 para a classe Latossolo Una.

Tabela 3.8 - Percentagens de Fe_2O_3 , carbono orgânico (C) e argila no horizonte superficial de dois solos da classe Terra Roxa Estruturada (TE), do Estado de São Paulo.

Solo *	Fe_2O_3 (%)	C %	Argila (%)
1	25.6	1.8	48
2	17.8	1.9	40

* Adaptada de Epiphanió et al. (1992)

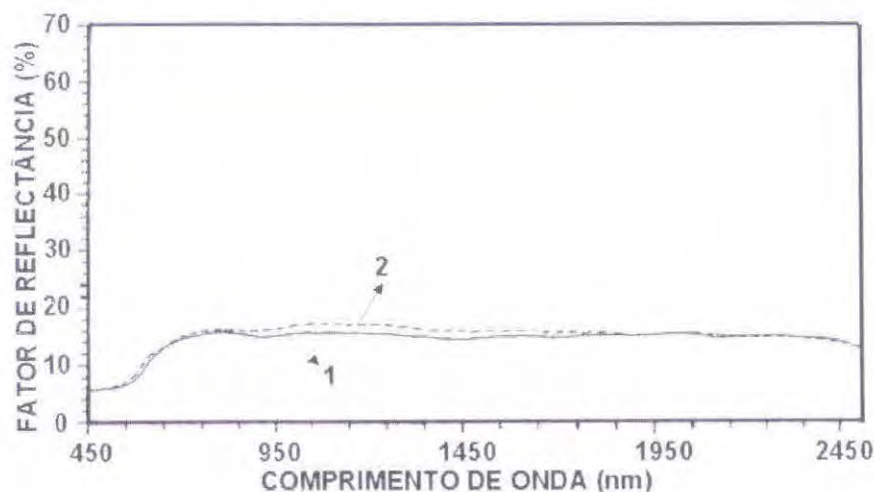


Fig. 3.20 - Curvas espectrais para amostras de solos contidas na Tabela 3.8 para a classe Terra Roxa Estruturada.

Observe na Figura 3.20 que as curvas espectrais das duas amostras de Terra Roxa Estruturada não apresentaram diferenças marcantes ao longo do espectro, embora apresentem diferenças bastante significativas nos teores de óxido de ferro. É interessante observar que, em termos de teor de carbono orgânico e de argila, as duas amostras também são muito semelhantes.

As curvas espectrais obtidas para as duas amostras de solos da classe Areia Quartzosa, conforme são mostradas na Figura 3.21, denotam diferenças marcantes nas reflectâncias na região do infravermelho próximo, que não são devidas ao óxido de ferro, pois ambas apresentaram o mesmo valor deste mineral (Tabela 3.9). Entretanto, observando os valores do carbono orgânico, conclui-se que esta diferença nas curvas espectrais, para esta região do espectro eletromagnético, está relacionada ao teor do carbono que é também um elemento que absorve a radiação no infravermelho próximo.

Tabela 3.9 - Percentagens de Fe_2O_3 , carbono orgânico (C) e argila nos horizonte superficial de dois solos da classe Areia Quartzosa (AQ).

Solo *	Fe_2O_3 (%)	C %	Argila (%)
1	1.1	0.5	6
2	1.1	0.4	9

* Adaptada de Epiphanió et al. (1992).

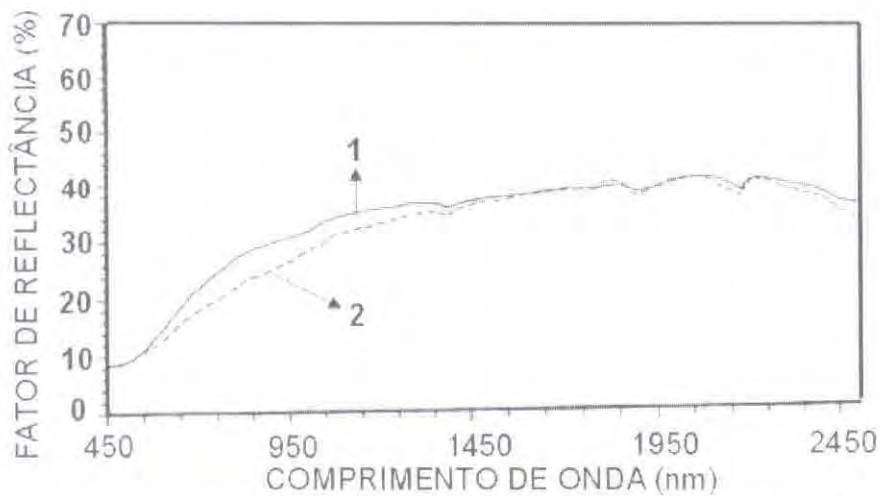


Fig. 3.21 - Curvas espectrais para amostras de Solos Areias Quartzosas descritas na Tabela 3.9.

Conforme foi comentado anteriormente, observando os valores do óxido de ferro, em todas as amostras, observa-se desde a Tabela 3.5 até a 3.10 que a porcentagem de Fe_2O_3 variou de uma amostra para outra, nas diferentes classes de solos, a exceção da classe Areia Quartzosa. Isto, para sensoriamento remoto, não deixa de ser um fator complicativo na resposta espectral destes alvos quando observados nos dados de satélites. Essas variações decorrem de fatores ambientais.

3.5.2 – Matéria Orgânica

A composição e o conteúdo de matéria orgânica no solo são reconhecidamente fatores de forte influência sobre a reflectância dos solos. À medida que o teor de matéria orgânica aumenta, a reflectância do solo decresce no intervalo de comprimento de onda de 400 a 2500 nm (Hoffer e Johannsen, 1969).

Segundo Baumgardner et al, (1970), quando o teor de matéria orgânica no solo excede a 2,0%, ela desempenha um papel importante na determinação das propriedades espectrais do solo. Quando o teor é menor do que 2,0%, outros constituintes do solo passam a ser mais influentes no comportamento espectral do solo do que a matéria orgânica.

Na Figura 3.22 são mostradas três curvas espectrais, obtidas de solos com materiais orgânicos em diferentes estágios de decomposição: ou seja, **materiais sápricos** (altamente decompostos), **materiais hêmicos** (moderadamente decompostos) e **materiais fíbricos** (fracamente decompostos).

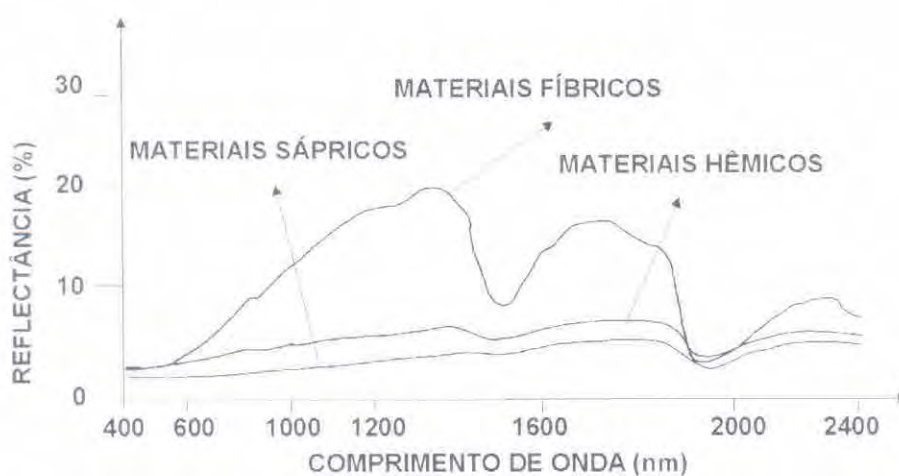


Fig. 3.22 - Curvas de solos orgânicos com materiais sápricos, hêmicos e fíbricos.

Nota-se na Figura 3.22 que quanto mais decomposto o material orgânico, como no caso dos sápricos, maior é a absorção de energia eletromagnética e, conseqüentemente, menor é a reflectância nesta região espectral.

Al-Abbas et al. (1972) comentam que os efeitos de diminuição da reflectância do solo pelo aumento do teor de matéria orgânica podem estar associados também ao teor de argila, uma vez que deve existir uma boa correlação entre os teores de argila e de matéria orgânica nos solos.

Saber a contribuição de cada constituinte orgânico (ácidos húmico e fúlvico, resíduos de plantas em decomposição, etc) na reflectância do solo, não está muito bem esclarecido. Sabe-se apenas que eles influenciam a reflectância do solo em diferentes graus. Montgomery (1976), citado por Epiphanyo et al. (1992), observou que a reflectância do solo na região espectral situada entre 600 e 1100 nm teve a mais alta correlação com teor de matéria orgânica nos solos.

3.5.3 – Rugosidade e Formação de Crosta Superficial

Hoffer e Johannsen (1969) comentam que, logo nas primeiras pesquisas sobre sensoriamento remoto em solos, foi possível reconhecer a presença de formação de crostas superficiais em áreas desnudas, pela diferença no comportamento espectral dessas áreas em relação às adjacentes do mesmo tipo de solo. A formação de crosta faz com que solos úmidos apresentem um comportamento espectral de solo seco. Segundo Cipra et al. (1971), solos com presença de crosta apresentam maiores valores de reflectância na região espectral de 430 a 730 nm, em relação àqueles cujas crostas foram desfeitas. Este fato foi mais tarde evidenciado por Assunção e Duarte (1980) nos estudos sobre identificação e mapeamento de solo preparado para plantio, na região de Ribeirão Preto, SP. Em seus estudos os autores utilizaram dados do MSS (Multispectral Scanner System) do Landsat, bandas 6 e 7 (visível e infravermelho próximo) e fotografias aéreas falsa cor, escala aproximada 1:20.000. Durante as fases de interpretação dos dados de satélite e de fotografias aéreas, os autores notaram que certas áreas preparadas para plantio apresentaram, nos dados do Landsat-3 (banda 4, região do visível) dois tons de cinza bastante distintos: um bem escuro, proveniente da maior absorção da radiação nesta faixa, pela presença de óxido de ferro e outro mais claro, embora fosse o mesmo solo. Após a verificação de campo, constataram a presença de crostas no solo exatamente onde a tonalidade de cinza era mais clara. Neste caso, a formação de crostas estava associada à diferença de tempo entre o preparo do solo, nestas áreas, e o período de coleta dos dados do satélite.

Por outro lado, durante o preparo do solo, principalmente no período de aração, é comum a formação de torrões. Este fato gera sobre o solo uma certa rugosidade do terreno, o que se pressupõe interferir na reflectância do mesmo. Essa rugosidade pode causar efeitos tanto de espalhamento como de sombreamento. Johannsen (1969) observou que os efeitos da rugosidade superficial de um alfisol arenoso (composto de alumínio e ferro) na reflectância espectral, sobrepujavam aqueles devidos à umidade do solo. Além da rugosidade, a prática de aração quebra a estrutura superficial do solo que, segundo Obukhov e Orlov (1964), aumenta de 15 a 20% a reflectância dos solos em relação àqueles com estrutura bem definida.

3.5.4 – Umidade do Solo

Foi comentado anteriormente que, num solo ideal, a proporção de água gira em torno de 25%. É claro que, nas condições de campo, esta proporção é muito variada. Por exemplo, para solos inundados a quantidade de água contida nos seus poros é total, enquanto que em solos desérticos a quantidade existente é bastante reduzida.

Por outro lado, quando o solo é molhado, sua coloração torna-se mais escura. Isto ocorre porque a absorção da radiação eletromagnética aumenta devido à presença da água, fazendo com que a

reflectância do solo decresça na região do visível e do infravermelho próximo ao espectro eletromagnético, quando comparado ao seu estado seco.

Solos úmidos, em geral, apresentam uma reflectância menor que os secos, na faixa de comprimento de onda de 400 a 2600 nm (Hoffer e Johannsen, 1969). Para ilustrar o que disseram os autores, na Figura 3.23 são mostradas várias curvas espectrais de solos contendo diferentes porcentagens de água. É possível observar ainda que todas elas apresentam bandas de maior absorção pela água em 1400 nm, 1900 nm e 2200 nm.

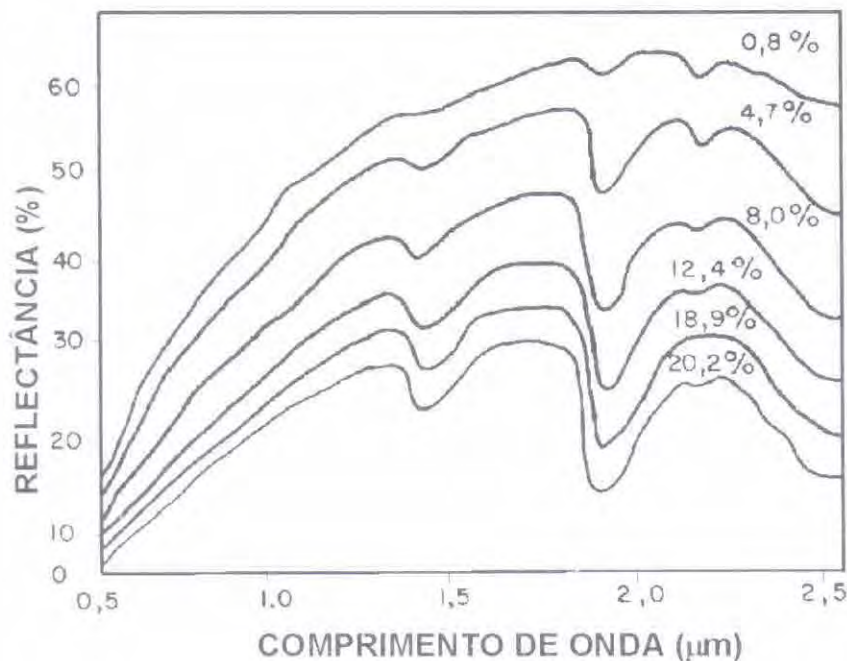


Fig. 3.23 - Curvas espectrais de solos contendo diferentes porcentagens de água. FONTE: adaptada de Bowers e Hanks (1965), p. 132.

3.5.5 – Distribuição do Tamanho de Partículas

Conforme consta na Tabela 3.1, os solos são formados por partículas de diferentes tamanhos. Entretanto, a caracterização textural de um solo é feita em função das frações areia, silte e argila. Observando ainda na Tabela 3.1, os valores de areia (2 a 0,05 mm), silte (0,05 a 0,002 mm) e argila (< 0,002 mm), nota-se que cada uma dessas frações pode estar no solo em diferentes tamanhos compreendidos nestes intervalos. Assim, um solo pode apresentar reflectância espectral diferente de outro solo da mesma classe por dois motivos: concentração e tamanho das partículas que compõem os solos.

Por outro lado, o arranjo físico e a agregação dessas partículas proporcionam ao solo uma estrutura. A textura e a estrutura são responsáveis pela quantidade e tamanho dos espaços porosos no solo, que são ocupados pela água e pelo ar. No caso de um solo ideal para cultivo, sem problema com excesso de umidade, o ar ocupa os poros maiores que 5 mm e a água poros menores que 5 mm.

A fração argila é a mais ativa quimicamente e pode ser constituída por minerais secundários, como a caulinita, montmorilonita e por sésquióxidos de alumínio e ferro.

Nos solos também podem existir os minerais primários, alguns deles com os mesmos nomes das argilas, como a caulinita, por exemplo. Bowers e Hanks (1965) mediram a reflectância da caulinita pura (mineral primário) em diferentes tamanhos, que variaram desde o tamanho de silte grosseiro (0,022 mm) até areia muito grossa (2,68 mm) e constataram que houve um aumento exponencialmente rápido na reflectância da caulinita em todos os comprimentos de onda, entre 400 e 1000 nm, à medida que o tamanho da partícula diminuiu. Partículas ou agregados maiores que 2 a 3 mm de diâmetro têm pouca influência na absorção adicional da radiação solar. Montgomery e Baumgardner (1974) e

Montgomery (1976), mostraram que o silte é o parâmetro isolado mais significativo para explicar a variação espectral em solos. Isto decorre em razão do tamanho da partícula de silte em relação aos comprimentos de onda na região reflectiva (visível e infravermelho) do espectro eletromagnético. Beck et al. (1976), ao analisarem a reflectância de solos siltosos, concluíram que a melhor faixa espectral para mapear teor de argila em solos superficiais, está contida entre 1500 e 1730 nm do espectro eletromagnético.

Por tudo o que foi visto nos itens anteriores, nota-se que cada constituinte do solo interage com a radiação eletromagnética diferentemente do outro. Porém, é sempre bom lembrar que no solo esses minerais não ocorrem isoladamente e, sim, formando o complexo solo. Desta forma, fica evidente que a energia refletida por um solo é a soma integrada de todas as energias refletidas pelos seus diferentes componentes.

A Tabela 3.10 traz informações de nomes de uso comum para referenciar solos em função da textura.

Tabela 3.11 - Grupamento de classes texturais

Classe	Frações
Textura arenosa	areia e areia franca
Textura média	< 35 % de argila > de 15% de areia
Textura argilosa	35 a 60 % de argila
Textura muito argilosa	> de 60 % de argila
Textura siltosa	< 35 % de argila < de 15 % de areia

FONTE: Oliveira et al. (1992).

Quadro 1 – Atualização da nomenclatura dos solos citados neste capítulo segundo Embrapa (1999).

<i>Sistema Brasileiro de Classificação (1998)</i>	<i>Classificação anteriormente usada</i>
ALISSOLOS	Podzólico Álico, Rubrozem Álico
ARGISSOLOS	Podizólico Vermelho-Escuro Tb, Terra Roxa Estruturada
CAMBISSOLOS	Cambissolo Húmico
ESPODOSSOLOS	Podzol Álico
GLEISSOLOS	Solonchak
LATOSSOLOS	Latossolo Vermelho-Amarelo Álico, Latossolo Ferrífero, Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho-escuro, Latossolo Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Variação Una, Latossolo Bruno,
ORGANOSSOLOS	Solo Orgânico
PLINTOSSOLOS	Glei Húmico, Glei Pouco Húmico

Capítulo 4

Noções básicas sobre vegetação e sua interação com a radiação solar

Para discutir a interação da radiação solar (radiação eletromagnética) com a vegetação, seja ela uma floresta, um campo, uma pastagem ou uma cultura agrícola, a primeira coisa que se deve fazer é entender o indivíduo que constitui esta comunidade vegetal, ou seja, a “planta”, uma vez que é nela que se processam todas as atividades físico-químicas e biológicas e é a menor unidade da vegetação que irá interagir com a radiação solar.

4.1 Anatomia da Planta

As plantas podem ser altas, baixas, tortuosas, rastejantes, trepadeiras, com caule aéreo ou subterrâneo, porém todas apresentam um conjunto de órgãos encarregados das funções necessárias à sua sobrevivência. Esses órgãos podem ser divididos em dois grupos: órgãos de nutrição e de reprodução.

- **Órgãos de nutrição** - destinam-se a manter o vegetal com vida. Nas plantas superiores são três: raiz, caule e folhas.

- **Órgãos de reprodução** – têm como função garantir a perpetuação da espécie e, também, são três: flor, fruto e semente.

Na Figura 4.1 pode-se visualizar as partes de uma planta superior, em que se tomou como base a planta de hibisco.

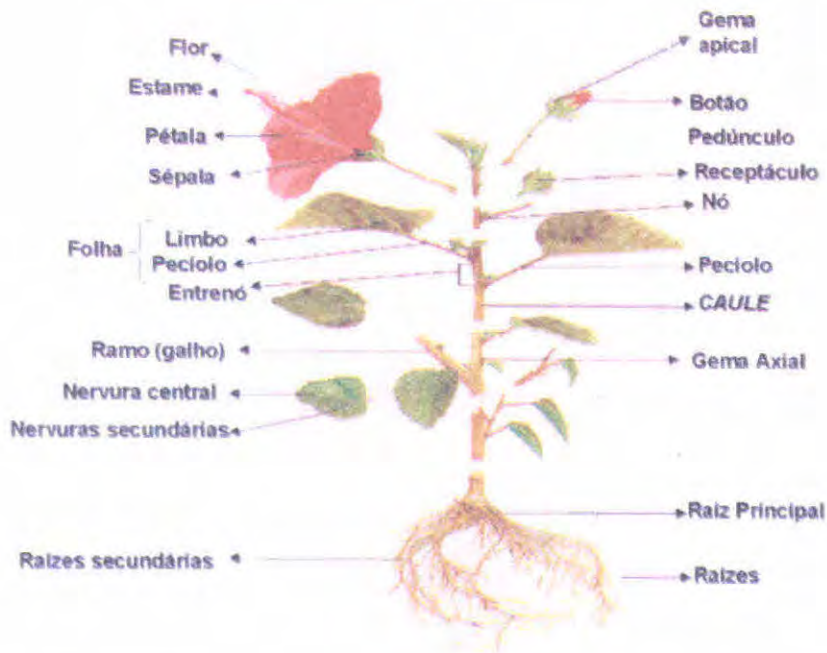


Fig. 4.1 – Planta de hibisco para mostrar as diferentes partes de uma planta.
FONTE: Barros (1995)

Do ponto de vista da fisiologia vegetal, todos os órgãos da planta são essenciais e desempenham funções que lhes são peculiares. Porém, para fins do sensoriamento remoto, basta entender os órgãos de nutrição, e com mais detalhe, as folhas, porque nelas são realizados todos processos fotossintéticos; ou seja, é basicamente nas folhas que há interação da energia solar com a planta. Por essa razão, neste capítulo, a preocupação maior foi descrever mais detalhadamente a folha e os processos que ocorrem dentro dela em nível celular.

4.1.1 – Raízes

As raízes têm a função de sustentação da planta e, além disso, absorvem água e nutrientes do solo. A zona de absorção de água e nutrientes na raiz estende-se desde a sua extremidade meristemática (zona de crescimento da raiz) até o ponto em que a suberização da epiderme se torna evidente.

Os pêlos absorventes geralmente estão presentes na zona de absorção podendo assim aumentar a área de contato raiz - solo.

As células da raiz são diferenciadas em camadas. A água (água + nutrientes) passa por todas estas camadas, através das células (processo intracelular) ou pelos espaços entre células adjacentes (intercelular), até atingir as células do xilema, localizadas no cilindro central (Figura 4.2). O movimento da solução do solo pela via intercelular dá-se devido à diferença de potencial. Neste caso, os solutos (água e nutrientes) são arrastados para o interior da raiz. A segunda via intracelular dá-se devido à diferença de potencial osmótico. Através deste mecanismo, os solutos movem-se por transporte ativo, isto é, por gasto de energia para sua translocação, do solo até o xilema.



Fig. 4.2 – Esquema de uma seção transversal de raiz, para mostrar as diferentes camadas e os diferentes tipos de transportes de soluções para o xilema. FONTE: adaptada de Reichardt (1993).

4.1.2 – Caule

Na planta, o caule desempenha basicamente duas funções: circular a seiva e servir de sustentáculo à própria planta.

Os caules podem ser eretos, tortuosos (como na vegetação de cerrado) e podem ser, ainda, classificados nos seguintes tipos: tronco, colmo, haste, trepador, rastejante. Pelo caule passam os vasos condutores da seiva bruta (o xilema) e da seiva elaborada (o floema) que estão ligados às folhas.

4.1.3 – Folhas

Nos vegetais, as folhas desempenham funções muito importantes, porque são basicamente nelas que se processam todas as reações fotoquímicas, para a síntese dos carboidratos, além de outras reações vitais para a vida da planta, como a respiração e a transpiração. Num corte transversal de uma folha pode-se observar uma série de camadas mais ou menos paralelas que são: as cutículas dorsal e ventral, a epiderme superior e a inferior, os parênquimas paliçádico e lacunoso, o xilema, a cavidade subestomática e os estômatos, conforme são vistos na Figura 4.3.

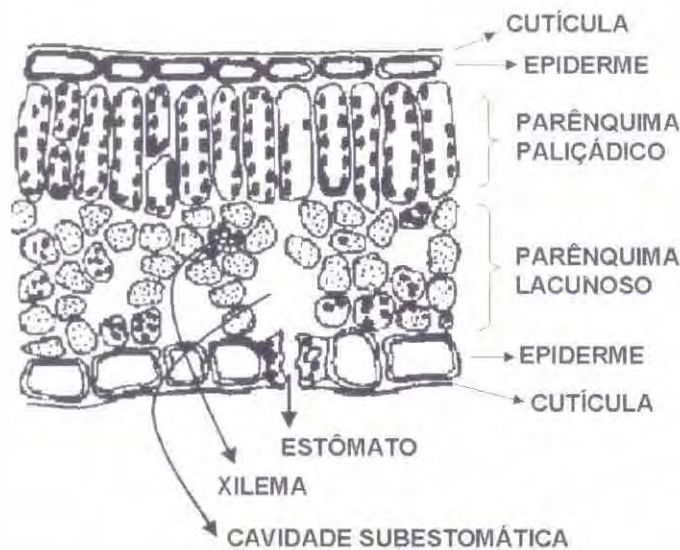


Fig. 4.3 – Esquema de um corte transversal de uma folha, para mostrar a distribuição das camadas constituintes. FONTE: Nobel (1974).

Nos vegetais, tal como nos animais, a estrutura fundamental é a célula. De modo geral, as células de qualquer órgão da planta são muito semelhantes, exceto as células das folhas, que contêm cloroplastos, que são organelas especializadas na síntese de carboidratos. Na Figura 4.4 é mostrado um esquema de uma célula típica de uma folha.

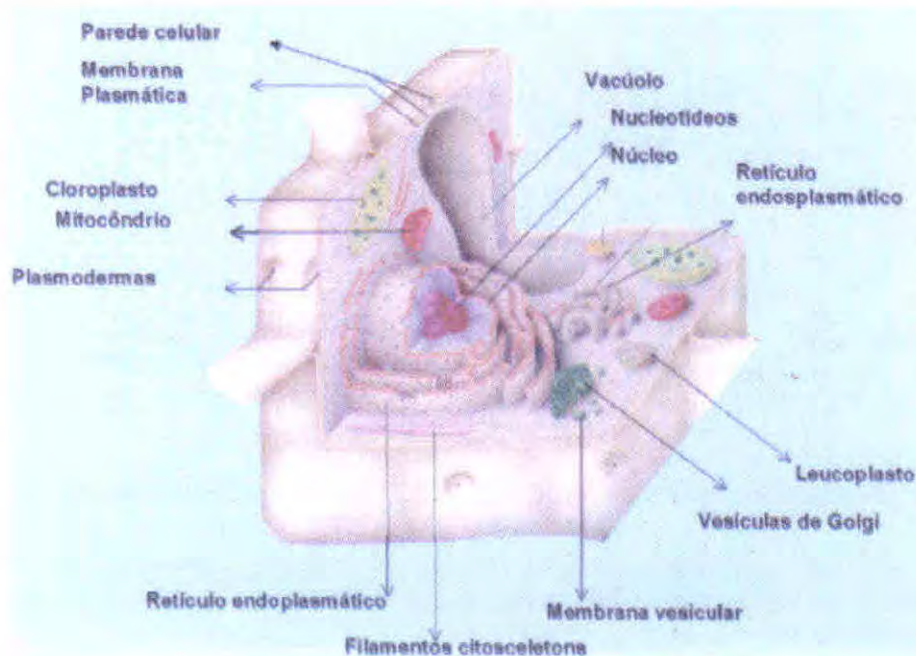


Fig. 4.4 – Diagrama de uma célula típica de uma folha, para mostrar seus constituintes. FONTE: Adaptada de Darnell et al. (1990).

Todos os processos de desenvolvimento da planta ocorrem em nível celular. Segundo Merva (1995), as substâncias mais relevantes para o desenvolvimento da planta, produzidas pelas células são: celulose, hemicelulose, proteínas, amido, gordura, pectina, cutina, lignina e suberina.

A **celulose** é o elemento básico na estrutura da planta, constituindo uma parte considerável da estrutura da parede celular de todos os órgãos da planta. **Pectina** é o adesivo que faz com que as células permaneçam juntas na planta. **Cutina, suberina** são ceras abundantes que formam a camada externa da planta. A cutina, em particular, é encontrada em todas as superfícies dos ramos, folhas, caules e frutos. A suberina é encontrada principalmente em células de cortiça na parte externa da raiz e de alguns tubérculos, como a batata. A **lignina** é o componente principal da madeira e é a responsável pelo endurecimento das paredes celulares.

4.1.3.1 – Função das folhas na planta

Nas plantas, as folhas exercem basicamente três funções principais: respiração, transpiração e fotossíntese.

4.1.3.1.1 – Respiração

Pela respiração, a planta absorve o oxigênio do ar e elimina o gás carbônico liberado de reações químicas de fotossíntese. A passagem desses gases é feita através dos ostíolos dos estômatos. A respiração ocorre tanto durante o dia como a noite. Os três principais componentes celulares que servem como substrato para a respiração são carboidratos, lipídios e proteínas, cujas moléculas são quebradas para produzir a energia necessária à respiração.

Os estômatos (*stoma*, do grego = abertura) são orifícios de 4 a 12 μm de largura por 10 a 14 μm

de comprimento, encontrados na superfície da folha (superior, inferior ou ambas, dependendo das espécies), através dos quais ocorrem as principais trocas gasosas entre a planta e a atmosfera. Através dele o vapor d'água sai da folha atingindo a atmosfera e o gás carbônico penetra nos espaços intercelulares sendo aproveitado no processo fotossintético. Cada estômato é constituído por duas células modificadas, células estomáticas ou também conhecidas por células guarda, entre as quais fica uma abertura, o ostíolo (Figura 4.5). Dando continuidade ao ostíolo tem-se a câmara subestomática. A estrutura do aparelho estomatal pode variar consideravelmente de planta para planta. Seu número médio é de cerca de 10.000 cm^{-2} .

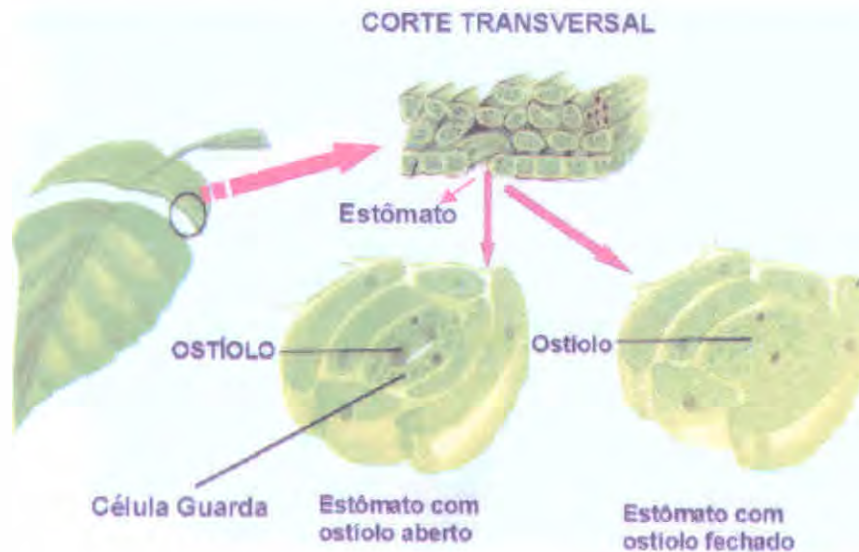


Fig. 4.5 – Esquema de um corte de uma folha para mostrar o estômato com o ostíolo aberto e fechado. FONTE: adaptada de Cruz (1997).

4.1.3.1.2 – Transpiração

A transpiração é o processo de eliminação de vapor d'água realizado, também, através dos estômatos. A transpiração produz uma espécie de sucção ao longo de toda a planta, isto é, conforme sai água pelas folhas, entra água pelas raízes. Essa sucção nas folhas faz-se através de ramificações do pecíolo dentro do limbo, denominadas nervuras; no interior delas há vasos lenhosos e liberianos, que são uma continuação dos que se encontram nos ramos e no caule.

Além da respiração, transpiração e fotossíntese, a folha serve também para eliminar água em forma de gotículas, processo este denominado de sudação. Essas gotículas saem por aberturas especiais que se encontram nas bordas e nas pontas das folhas. A sudação é mais intensa à noite com baixa temperatura e grande umidade do ar.

A respiração, a transpiração e a sudação não estão relacionadas diretamente com a radiação solar, embora utilizem a energia química proveniente do desdobramento de moléculas de compostos produzidos na fotossíntese.

4.2 Interação da Radiação Solar com a Planta

Independente dos fatores ambientais, a radiação difusa é sempre maior que a radiação direta, conforme foi demonstrado no balanço de energia (Capítulo 2). Deste modo, uma grande parte da energia disponível para as plantas está na forma de radiação difusa que, por não ter dependência angular, atinge o interior da copa e as partes inferiores da vegetação (Bernardes, 1987).

Por outro lado, nem toda a radiação que atinge a planta tem efeito sobre ela. As radiações

eletromagnéticas, cujos comprimentos de ondas são capazes de induzir uma resposta fisiológica nas plantas, isto é, capaz de provocar uma reação fotoquímica, são denominadas de radiação fisiologicamente ativa (RFA). Na Tabela 4.1 podem ser vistas as reações fotoquímicas, os respectivos fotoreceptores, os picos de absorção e as bandas espectrais em que a radiação é absorvida.

Tabela 4.1 – Principais reações fotoquímicas das plantas superiores

Processo	Reações	Fotoreceptor	Pico do espectro (nm)	Banda espectral (nm)
Síntese de clorofila	Redução da protoclorofila	Protoclorofila	Azul: 445 Vermelho: 650	350 - 470 570 - 670
Fotossíntese	Dissociação da água e redução do CO ₂	Clorofilas e carotenúides	Azul: 435 Vermelho: 675 Vermelho: 650	350 - 530 600 - 700
	Acréscimo da fotossíntese	Clorofilas	Vermelho distante: 710	630 - 690 690 - 730
Reações no Azul	Fototropismo	Carotenóides e flavinas	U.V.: 370 Azul: 445 - 475	350 - 500
Reações no Vermelho	Germinação da semente, síntese da antocianina, crescimento vegetativo e da semente, crescimento heterotrófico.	Fitocromo	Indução pelo Vermelho: 660	570 - 700
			Reversão pelo vermelho distante: 710 e 730	680 - 780

A radiação solar que chega na superfície da Terra (radiação global) ao atingir a planta, interage com a mesma e resulta em três frações, a saber: uma parte dessa radiação é **absorvida** pelos pigmentos contidos na folha. Essa quantidade que é absorvida participa na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), altera estruturas moleculares (fotoconversão), acelera reações, como por exemplo, a foto-oxidação das xantofilas ou ainda destrói estruturas de uma molécula. A parte absorvida corresponde a aproximadamente 50% do total que chega até a planta. Outra parte é refletida pelas folhas, fenômeno denominado de **reflexão**. Finalmente, uma terceira parte sofre o processo de **transmissão**, através das camadas de folhas que compõem a copa e através das camadas que constituem a folha, como a cutícula, o parênquima lacunoso e o paliádico, etc.

Na Figura 4.6 estão esquematizados os processos de interação da energia solar com as folhas.

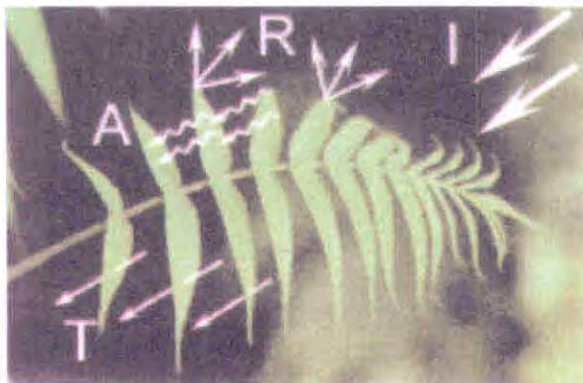


Fig. 4.6 – Interação da energia solar com a folha, onde "I" é a radiação incidente, "R" é a energia refletida, "A" é a parte absorvida e "T" a parte transmitida.

As quantidades de energia absorvida, transmitida ou refletida pelas folhas das plantas podem diferir de uma espécie para outra ou até mesmo dentro da própria espécie, porque existem, dentre outros, os fatores ambientais que influenciam direta ou indiretamente nesta interação. Entretanto, as proporções destas três componentes sempre guardam o princípio da conservação de energia, expresso pela segunda lei da termodinâmica, ou seja:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (4.1)$$

onde, ϕ_i , ϕ_r , ϕ_a e ϕ_t são os fluxos (quantidades) de energia incidente, refletida, absorvida e transmitida, respectivamente.

Normalizando a Equação (4.1) em relação ao fluxo incidente (ϕ_i), tem-se:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (4.2)$$

onde: as razões adimensionais ρ , α e τ são denominadas de reflectância, absortância e transmitância, respectivamente, cujos valores definem as propriedades radiométricas dos alvos analisados.

4.2.1 – Porção Absorvida da Radiação Solar

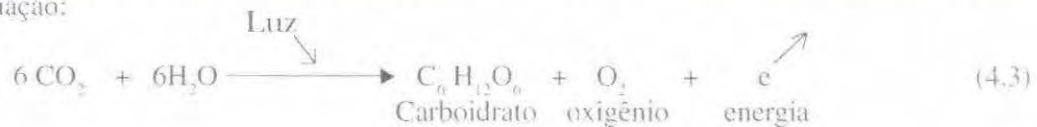
Dos três componentes resultantes da interação da radiação solar com a planta (reflectância, absortância e transmitância), a parte absorvida (absortância) é a de maior interesse em todas as pesquisas relacionadas à produção vegetal, inclusive para o sensoriamento remoto agrícola, porque é através da quantificação desta variável que o especialista em sensoriamento remoto poderá tirar conclusões importantes a respeito das condições fitossanitárias de determinada cultura agrícola. Entretanto, quando se trata de sensoriamento remoto orbital ou suborbital, esta variável é, geralmente, estimada através da quantificação da parte refletida, por restrições tecnológicas dos equipamentos colocados nos satélites orbitais ou em aeronaves, que somente registram a radiação refletida ou emitida pelos alvos da superfície terrestre. Em muitos casos, o especialista em sensoriamento remoto não chega a estimar a quantidade de radiação absorvida pela planta para inferir sobre o estado da cultura ou da vegetação. Geralmente, fazem-se inferências sobre a cultura com base apenas no comportamento da energia refletida, o que não deixa de ser uma inferência indireta da radiação absorvida pela vegetação.

No que diz respeito à energia luminosa, foi mostrado no Capítulo 2, que ela é praticamente constante no topo da atmosfera, podendo sofrer atenuações ao longo de sua trajetória à medida que ela penetra na atmosfera. Além de constituintes da atmosfera e partículas dispersas, a quantidade de radiação que chega até a planta depende muito da época do ano, latitude, longitude, declividade e direção da face do terreno. Entretanto, tem sido observado que as variações no fluxo de energia luminosa por unidade de área e por unidade de tempo, em função desses outros fatores não atmosféricos, são relativamente pequenos e constantes para um determinado local. Com isto, o que se procura, então, por parte dos pesquisadores, é melhorar as plantas no que diz respeito ao uso eficiente da radiação para produção de grãos e/ou fitomassa ou outra parte da planta, através dos processos de seleção de variedades.

Das três funções principais da folha, a fotossíntese é o único processo que está diretamente envolvido com a radiação solar. Os outros dois processos, isto é, a respiração e a transpiração, como foi dito, utilizam a energia resultante de reações químicas que ocorrem na planta (quebra de moléculas de substâncias produzidas pela fotossíntese) para obter a energia necessária para sua sobrevivência. Neste capítulo, visando o contexto do sensoriamento remoto, será dada maior ênfase ao entendimento da utilização da radiação solar na fotossíntese e aos fatores que interferem nesta interação.

4.2.1.1 – Utilização da energia solar na fotossíntese

A fotossíntese é o processo através do qual as plantas verdes produzem carboidratos (açúcares), a partir da água (absorvida pelo sistema radicular), e do CO₂ absorvido da atmosfera, mediado pela *radiação fotossinteticamente ativa absorvida* (RFAAb), ou seja, radiação solar de comprimento de onda entre 400 e 700 nm, também denominada de luz visível. A fotossíntese pode ser expressa pela seguinte equação:



O açúcar sintetizado no processo de fotossíntese é usado de diversas maneiras pela planta. Nas células, as moléculas de açúcar, na presença do oxigênio, são decompostas em outros compostos menores, liberando a energia que a planta necessita para viver. Pela ação das enzimas, o excesso de fotoassimilados é convertido em amido, o qual é armazenado nas raízes, caule, folhas e frutos para uso futuro.

O processo fotossintético pode ser dividido em duas etapas: a) **Reações da luz (ou fotorreações ou reações fotoquímicas)** – são os passos envolvidos na captura da energia luminosa pelos cloroplastos e b) **Reações escuras** – são reações bioquímicas que consistem na redução do gás carbônico (CO₂) e produção de açúcares.

As reações do escuro, embora sejam importantes do ponto de vista de produção do açúcar, não são relevantes para serem tratadas com maiores detalhes neste capítulo. Assim, as reações da luz ou fotorreações são as mais importantes, no contexto do sensoriamento remoto, por estarem diretamente envolvidas com a interação da radiação solar com a planta.

4.2.1.1.1- Reações da luz ou fotoquímicas

A fotossíntese ocorre eficientemente com a luz azul (400 – 430 nm) e com a luz vermelha (radiação eletromagnética compreendida entre os comprimentos de onda 600 e 730 nm) que são captadas pelos pigmentos do cloroplasto. Além disso, a reação entre a água e o gás carbônico, produzindo carboidratos e oxigênio, dá-se exclusivamente em presença de luz e é confinada, também, nos cloroplastos.

Os cloroplastos são partículas subcelulares, genericamente denominadas organelas, que ocorrem nos tecidos verdes, em maiores quantidades nas células do mesófito das folhas. Originam-se dos proplastídeos, que são típicos de tecidos estiolados. Em plantas superiores, os proplastídeos se multiplicam durante a divisão celular e mantem-se, assim, em número aproximadamente estável em cada célula.

Os proplastídeos sofrem grandes transformações estruturais durante o processo de ontogênese dos cloroplastos, que são iniciados a partir de sua exposição à luz. O sistema de lamelas se forma a partir de invaginações da membrana interna.

Nas plantas superiores, os cloroplastos assemelham-se a corpúsculos aproximadamente elipsóides, com 5 a 10 μm de diâmetro, e que ocorrem em número de 10 a 100 nas células do parênquima foliar. Em geral, os cloroplastos são constituídos de:

- **Envelope** – membrana externa que possui característica típica de membrana unitária dupla, semelhante à plasmalema e ao tonoplasto.

- **Estroma** – matriz líquida.

- **Granum** – são vários conjuntos de membranas em forma de discos achatados e dispostos uns sobre os outros. Cada granum é composto de um número variável de discos membranosos, chamados tilacóides.

- **Lamela** - são membranas duplas que se dobram sobre si mesmas e formam canais ou vesículas

alongadas, interligando os grana. O sistema de lamela forma-se a partir da invaginação da membrana interna do envelope, geralmente, disposta em uma extremidade da organela.

Na Figura 4.7 é mostrado um corte de uma folha contendo as camadas, a célula vegetal, o cloroplasto e o granum.

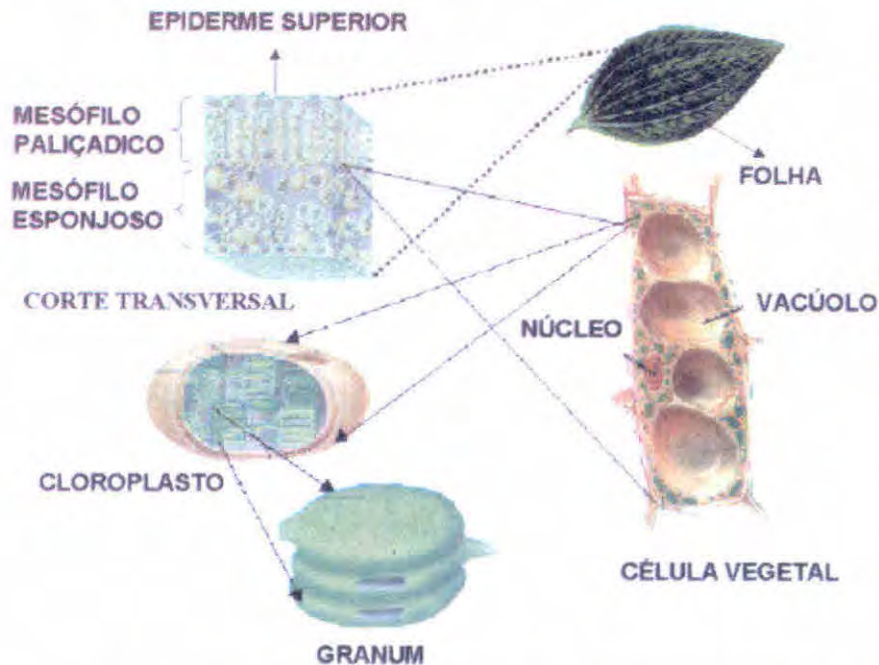


Fig. 4.7 - Corte de uma folha para mostrar as camadas, uma célula, o cloroplasto e o granum. FONTE: adaptada de Darnell et al. (1990).

Os cloroplastos podem ser de dois tipos: cloroplastos classe I e cloroplastos classe II. Os cloroplastos da classe II são desprovidos de estroma. Por esta razão, não são capazes de fixar o CO_2 para produção de carboidratos, embora apresentem atividades fotoquímicas. Os cloroplastos da classe I realizam todos os processos fotossintéticos.

O sistema de membranas, representado pelo **grana** (plural de granum) e pelas lamelas, é a sede das reações fotoquímicas, responsáveis pela captação e transformação da energia luminosa em energia química (Trifosfato de Adenosina – ATP e Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo de Piridina Fosfato Reduzida – NADPH).

É na matriz ou estroma o local de ocorrência das reações envolvidas na fixação do gás carbônico e a conseqüente produção de carboidratos, além de outros derivados tais como: aminoácidos, ácidos orgânicos e graxos.

Entre os componentes específicos dos cloroplastos, os mais importantes são os pigmentos e as clorofilas. Nas plantas superiores, encontram-se também outros pigmentos que são os carotenos e as xantofilas, conforme é mostrado na Tabela 4.2. Na Figura 4.8 é mostrada a fórmula estrutural da clorofila “a” e as fórmulas moleculares das clorofilas “a” e “b”.

Tabela 4.2 – Pigmentos encontrados nos cloroplastos de plantas superiores e algumas algas, associados à transferência de energia para o processo fotossintético.

Pigmentos	Máxima absorção da Luz (nm)	Ocorrência	
Clorofila "a"	430 - 660	Todas as plantas superiores	
Clorofila "b"	453 - 643	Plantas superiores e algas verdes	
α -Caroteno	420, 440 e 470	Plantas superiores e algumas algas	
β -Caroteno	425, 450 e 480	Todas as plantas superiores	
Xantofila	Lutol	425, 445 e 475	Plantas superiores e algumas algas
	Violoxanto	425, 450 e 475	Plantas superiores

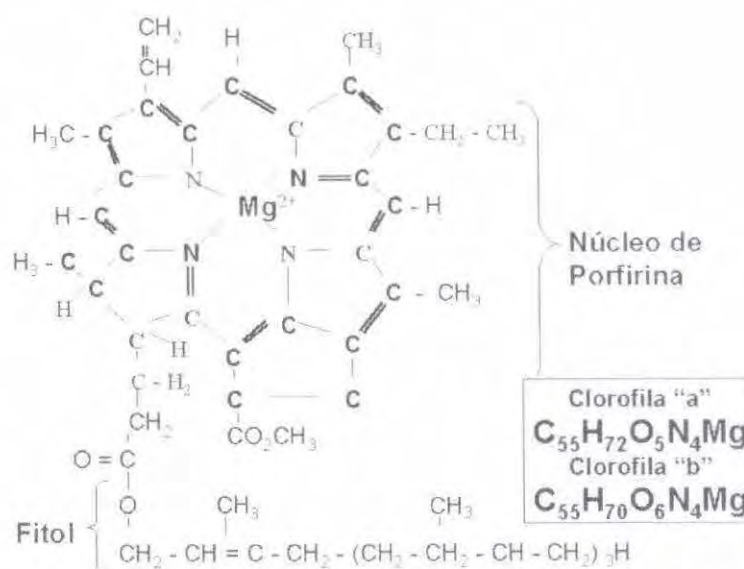


Fig. 4.8 – Fórmula estrutural da molécula de clorofila "a" e a fórmula molecular das clorofilas "a" e "b". FONTE: adaptada de Darnell et al. (1990).

A clorofila "a", além de ocorrer em todas as células fotossintetizantes, conforme pode ser visto na Tabela 4.2, desempenha um papel fundamental no processo de bioconversão de energia.

As estruturas das clorofilas "a" e "b" são basicamente as mesmas. Compõem-se da porção porfirina, constituída de quatro anéis de pirol ligados por "pontes" de carbono-hidrogênio. O íon magnésio (Mg) insere-se no centro da porfirina unido por quatro átomos de nitrogênio. Outra característica da molécula de clorofila é a cadeia carbônica denominada fitol, que é ligada ao sistema de anéis pirolicos, conforme é mostrado na Figura 4.8.

O exame dos espectros de absorção para três pigmentos (clorofila "a", "b" e β -caroteno) contidos no cloroplasto, mostra picos distintos de reflexão na região do visível (Figura 4.9).

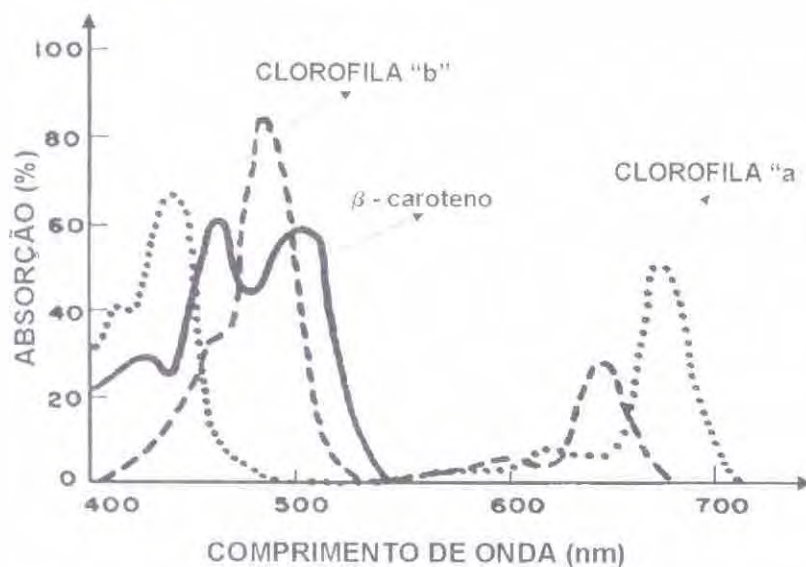


Fig. 4.9 – Curvas de absorção da energia luminosa (400 a 700 nm) pelos pigmentos do cloroplasto (Clorofila "a", "b" e β -caroteno). FONTE: Darnell et al. (1990).

Conforme é mostrado na Figura 4.9, as clorofilas "a" não absorvem a luz na região do verde, enquanto que a curva de absorção da clorofila "b" é deslocada em direção à luz verde, mais ou menos até 530 nm. Este fato, justifica porque as plantas umbrófilas (adaptadas à sombra) apresentam maior quantidade de clorofila "b", em relação à clorofila "a".

Outro fato importante, que pode ser visto nas curvas contidas na Figura 4.9, é que a luz azul (400 a 500 nm) é mais eficientemente absorvida pelas clorofilas do que a luz vermelha. Além disso, observa-se que a clorofila "b" é mais eficiente do que a clorofila "a" para absorver a luz azul. Por sua vez, a clorofila "a" é mais eficiente para absorver a luz vermelha do que a clorofila "b".

O pigmento β -caroteno absorve a energia solar de 400 a \pm 530 nm, apresentando dois picos de máxima absorção entre 480 e 520 nm.

Os pigmentos do cloroplasto apresentam colorações da seguinte forma: a) clorofila "a", cor verde-azulada; b) clorofila "b", cor verde; c) carotenos são amarelos e d) xantofilas, alaranjadas.

• Absorção da luz pelos pigmentos

De acordo com a teoria corpuscular, a radiação luminosa é transportada como "pacotes" de energia, denominados fótons ou quanta. Nos processos fotossintéticos, é comum tratarem-se quantidades de energia em função de um mol de quanta (1 mol de quanta = $6,02 \times 10^{23}$ quanta = 1 einstein) e expresso em quilocaloria (Kcal) por mol.

Por outro lado, a energia de um quanta é diretamente proporcional à frequência da onda e é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. Assim, tem-se:

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad c = \lambda \nu \implies \nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4.8)$$

onde: E é expresso em ergs, joules, eletro-volts ou calorias.

Por exemplo, a absorção de 1 mol de fótons de luz vermelha no comprimento de onda de 680 nm contém uma considerável quantidade de energia que é igual a 42 Kcal/mol. Lembre-se que $E = h \nu$, em que h é a constante de Planck ($1,58 \times 10^{-34}$ cal/s), ν é a frequência da onda, e um mol de fótons corresponde a $6,23 \times 10^{23}$ fótons. Para radiações com comprimentos de onda menores, por exemplo, 1 mol de fótons de luz azul, no comprimento de onda de 400 nm, equivale a cerca de 71 Kcal/mol. Por esses dois exemplos, percebe-se que a radiação solar com menor comprimento de onda possui maior intensidade de energia do que aquelas de comprimentos de ondas maiores. Este fato é facilmente percebido na Eq. 4.8.

Para que a energia luminosa possa ativar o sistema fotossintético, ela deve afetar a estabilidade química das moléculas envolvidas no processo, isto é, induzir uma diminuição da energia de ligação dos compostos e, conseqüentemente, possibilitar uma reação química. Para que isto ocorra, a energia dos quanta precisa ser transferida para as moléculas a fim de torná-las excitadas e reativas. A energia de ligação dos compostos orgânicos estáveis é da ordem de 50 a 100 Kcal/mol, o que significa que energias luminosas com 25 a 50 Kcal/einstein são suficientes para promover a excitação molecular e, portanto, uma reação química.

Em geral, a energia eletromagnética da região do ultravioleta é muito elevada e pode causar decomposição das moléculas, liberando radicais ou átomos livres. Por outro lado, na região do infravermelho, a energia não é suficiente para causar diminuição sensível na estabilidade das ligações químicas. Por esta razão, estas energias não são aproveitadas na fotossíntese. Desta forma, quando um quantum, com suficiente energia, atinge uma molécula, a energia é inteiramente transferida para ela tornando-a excitada. Aqui é oportuno lembrar que todo este processo ocorre em nível atômico.

As moléculas estáveis possuem átomos com número par de elétrons nos orbitais mais externos. Cada elétron possui uma quantidade de energia que depende de sua distância em relação ao núcleo do átomo, sendo que parte desta energia provém de sua rotação em torno do próprio eixo.

Quando a energia radiante (luz) atinge os elétrons, estes são deslocados para um nível energético superior, tornando-se, assim, excitados. Neste estado energético, a molécula entra em processo de vibração, cujo período é da ordem de 10^{-13} a 10^{-12} segundos.

O tempo de permanência dos elétrons no estado excitado é de 10^{-9} segundos, o que propicia à molécula muitos milhares de vibrações. Estas vibrações são responsáveis pela perda de parte da energia dos elétrons, a qual é absorvida pelo meio externo através da transferência de calor. Após terem perdido parte de sua energia por vibração, os elétrons podem voltar ao estado estável, perdendo o restante da energia pela emissão de radiação de comprimentos de onda mais longos (menos energéticos) na forma de fluorescência. O tempo em que a molécula permanece excitada, isto é, entre a absorção do quantum e a emissão da fluorescência, é denominado de vida média do estado excitado.

No caso da clorofila "a" em solução, que absorve a luz vermelha, a sua vida média é de $1,5 \times 10^{-8}$ segundos, o que é muito curto para que ocorra transferência de energia ou para a realização de uma reação química.

Por outro lado, a molécula excitada, ao invés de dissipar energia na forma de fluorescência ou emissão de calor, pode perder sua energia através de conversão interna, ou seja, transferir o movimento vibracional para outras moléculas (intermolecular), e causar a inversão do sentido de rotação de um dos seus elétrons, os quais passarão a girar na mesma direção. Deve ser lembrado que os elétrons de um par eletrônico, em qualquer nível energético (órbita), têm sentidos de rotação contrários para que possam permanecer no mesmo nível energético. Este estágio metaestável tem uma vida média mais longa (acima de 1 milissegundo) e a volta ao estado estável pode ser acompanhada da emissão de radiação de comprimento de onda também mais longa e de fraca intensidade, denominada fosforescência. Essa vida média mais longa, no estágio metaestável permite à molécula interagir com outra molécula, transferindo energia por ressonância para participar de uma reação fotoquímica.

Existe, ainda, a possibilidade de os elétrons receberem energia do meio externo e retornarem ao seu estado excitado. Neste caso, a perda de energia dar-se-á por dissipação de calor ou por fluorescência que será retardada em sua emissão.

A fluorescência característica da clorofila "a" ocorre após a absorção de luz vermelha no comprimento de onda de 668 nm (Figura 4.9). A absorção da luz azul, mais energética, não causa emissão de fluorescência, pois os elétrons perdem energia inicialmente na forma de calor e atingem níveis energéticos inferiores, característica da absorção da luz vermelha (600 a 700 nm). Neste ponto, ocorrerá fluorescência caso os elétrons retornem ao nível estável.

Quando um quantum de energia é absorvido, por um pigmento do cloroplasto, por exemplo, a clorofila "b", esta se torna excitada e transfere a energia para outro pigmento, a clorofila "a", ocorrendo

a emissão de fluorescência apenas pelo segundo pigmento (clorofila "a"). Entretanto, esta transferência de energia ocorre somente em duas condições: quando as moléculas se encontram próximas umas das outras e quando a molécula receptora absorve energia em comprimentos de onda mais longos do que aqueles emitidos pela molécula doadora (fluorescência é a emissão de energia em comprimento de onda mais longo).

Segundo Magalhães (1985), resultados experimentais indicam que a absorção da luz nos cloroplastos, se faz através da cooperação de várias moléculas de clorofilas, o que resulta em um aumento da eficiência da fotossíntese. Segundo ainda o autor, são necessárias 250 moléculas de clorofilas para absorver um quantum de energia. Esse conjunto de moléculas é, então, denominado de *unidade fotossintética*.

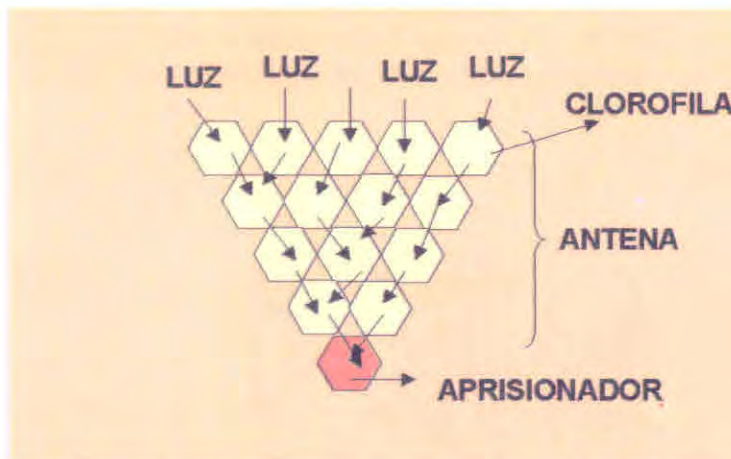


Fig. 4.10 – Esquema de uma unidade fotossintética. FONTE: adaptada de Magalhães (1985).

Na unidade fotossintética, os quanta de energia incidente são transferidos de molécula a molécula (antena), ocorrendo a concentração de energia em um único pigmento, que é chamado de *aprisionador*. As demais clorofilas funcionam como antenas que captam radiação e transferem suas energias para o *aprisionador*, conforme é mostrado na Figura 4.10. Desta maneira, o *aprisionador* pode receber cerca de 200 a 300 vezes mais quanta de energia por unidade de tempo do que se absorvesse luz isoladamente (Magalhães, 1985).

Resultados de experimentos subsequentes, mostraram que o processo de transferência de energia radiante é realizado por dois tipos de unidades fotossintéticas, ou seja, fotossistema I e fotossistema II (Figuras 4.11A e B). Ambos são constituídos por moléculas de clorofila "a" e "b" em diferentes proporções, sendo que o fotossistema I contém mais clorofila "a" do que clorofila "b" (Figura 4.11B). Os dois funcionam em série, absorvem luz e transferem elétrons um para o outro, através de reações químicas. O fotossistema II acumula radiação de comprimento de onda menor (682 nm), enquanto, no fotossistema I, a energia acumulada tem comprimento de onda de 700 nm.

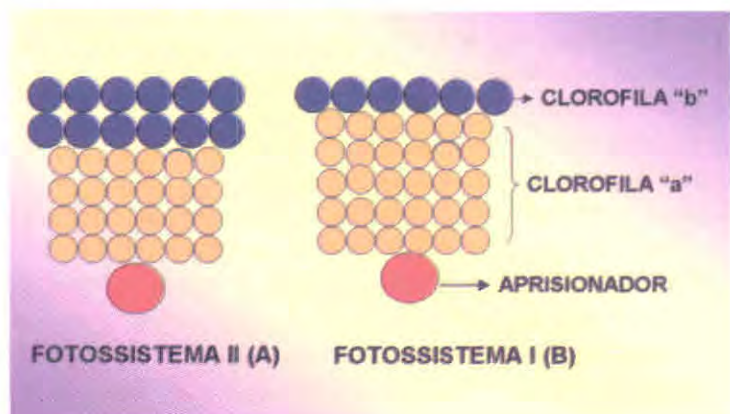


Fig.4.11 – Desenho para mostrar a distribuição das clorofilas nos fotossistemas, e a proporção dos pigmentos em cada unidade fotossintética. FONTE: adaptada de Magalhães (1985).

Quando um fóton de energia de comprimento de onda de 680 nm é absorvido pelas moléculas de clorofilas, no fotossistema II, ela é transferida para o *aprisionador*. Uma reação físico-química se realiza entre a energia capturada e duas moléculas de água, provocando o processo de dissociação da água, liberando oxigênio e 4 elétrons. Esses elétrons liberados são levados para um estado de energia mais alto; isto é, ocorre uma mudança de nível orbital (Equação 4.9). Os elétrons liberados movem-se através de uma série de moléculas, denominadas mensageiras entre o fotossistema II e o fotossistema I. Neste processo, uma das proteínas excitada cataliza a reação do **difosfato de adenosina** (ADP) com um íon de fosfato inorgânico para formar o ATP (**trifosfato de adenosina**).

Após a formação do ATP, os elétrons passam e ativam o fotossistema I. Um segundo “pacote” de energia no comprimento de onda de 710 nm é absorvido no fotossistema I. Esses elétrons movimentam-se ao longo de uma segunda série de moléculas mensageiras reduzindo o NADP (nicotinamida adenina dinucleotídeo de piridina fosfato) em NADPH (nicotinamida adenina dinucleotídeo de piridina fosfato reduzida). Esse processo é conhecido por **ESQUEMA EM “Z”**, representado na Figura 4.12.

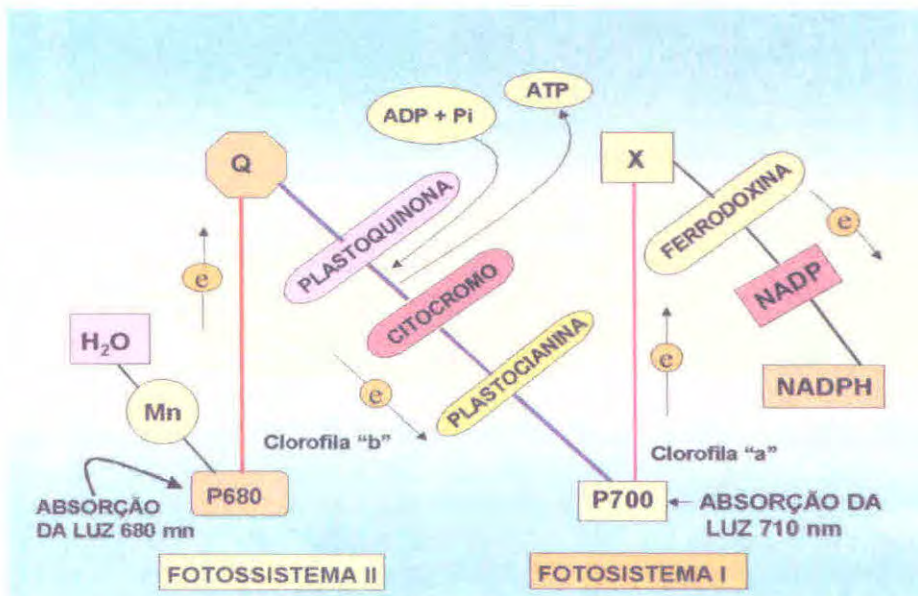
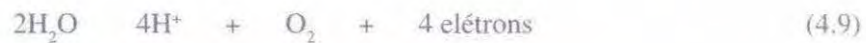


Fig. 4.12 – Esquema em Z, mostrando a captura da energia luminosa pelos fotossistemas I e II. FONTE: adaptada de Magalhães (1985).

Observe na Figura 4.12 que o ATP é formado após a absorção da energia luminosa pelo fotossistema II, e o NADPH após o segundo pacote de energia luminosa de comprimento de onda de 710 nm ter sido absorvido. O ATP e o NADPH são as energias que conduzirão as reações no escuro da fotossíntese.

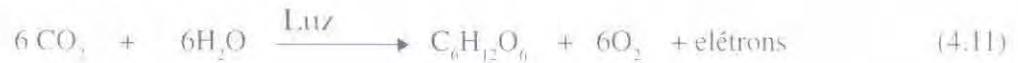
Na reação da fotossíntese, a energia absorvida pelos pigmentos (contida nos aprisionadores) é transferida para outros compostos, principalmente para a dissociação da molécula de água, através de transporte eletrônico. Nestas condições, a substância doadora de elétron, a clorofila, torna-se oxidada (perde elétrons) e o composto receptor de elétrons se reduz (ganha elétrons). Desta forma, pode-se dizer que as reações fotoquímicas da fotossíntese são reações de óxido-redução. A reposição dos elétrons removidos da molécula de clorofila se faz através de reações que envolvem a foto-oxidação da água.

Nas reações de óxido-redução, a energia envolvida no processo, pode ser expressa em termos de potenciais de óxido-redução – E_o (energia necessária para promover uma reação de óxido-redução). O processo para calcular a energia livre da fotossíntese, isto é, o quanto de energia é gasto nas reações envolvidas na dissociação da água e na redução do CO₂ para carboidrato, é dividido em duas etapas: a) reações para dissociar a molécula de água e b) formação do carboidrato a partir do CO₂:

Reação 1: Dissociação da molécula de água



Reação 2 : Redução do CO_2



$E_{\text{O}_1} : +0,81 \text{ Volt}$

$E_{\text{O}_2} : -0,40 \text{ volt}$

onde, E_{O} é a diferença de potencial de oxido-redução e os sinais (+) e (-), indicam que as reações são exotérmicas (+, libera energia) e endotérmicas (-, absorve energia).

A diferença de potencial de óxido-redução é, portanto, de 1,21 volt, ou seja:

$$E_{\text{O}_{1,2}} = +0,81 - (-0,40) \longrightarrow 1,21 \text{ volt}$$

Multiplicando 1,21 volt por 4 (número de elétrons envolvidos na reação) e, em seguida, por 23 Kcal/mol (valor da constante de Faraday, que expressa a carga elétrica de 1 mol de elétrons) tem-se:

$$E_{\text{O}_{1,2}} = 1,21 \text{ volt} \times 4 \times 23 \text{ Kcal/mol} = 112 \text{ Kcal/mol.}$$

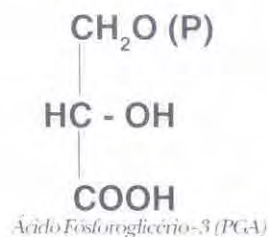
onde: $E_{\text{O}_{1,2}}$ é uma estimativa aproximada da energia livre no processo da fotossíntese.

4.2.1.1.2 - Reações escuras

São reações pelas quais o CO_2 é reduzido para formar o carboidrato. O ciclo completo é, freqüentemente, denominado de **ciclo de Calvin**.

No ciclo de Calvin o ATP e o NADPH são utilizados para formar o complexo ribulose-1,5 difosfato (RuDP) na presença da enzima Ribulose-1,5 Difosfato Carboxilase, também conhecida por Rubisco.

O RuDP reage com o CO_2 dando origem a duas moléculas do ácido fosfoglicérico-3 (PGA), que é o primeiro produto formado na fotossíntese via ciclo de Calvin, cuja fórmula molecular é:



As plantas cujo primeiro produto se forma via ciclo de Calvin são denominadas **plantas C_3** . Entretanto, também há plantas cuja formação do carboidrato dá-se por um processo diferente do ciclo de Calvin, as quais são denominadas plantas C_4 e as plantas CAM (metabolismo ácido das crassuláceas). Porém, as reações (ditas da luz) têm como base os mesmos princípios vistos para as plantas C_3 , sendo, portanto sem interesse discutir o procedimento da produção do carboidrato, uma vez que, para os objetivos do sensoriamento remoto o que interessa é o conhecimento de captura da energia luminosa, ou seja, a interação da energia solar com a planta. Entretanto, isso não quer dizer que o conhecimento de todo o processo fotossintético seja desnecessário.

4.2.2 – Porção Refletida da Radiação Solar

Das três componentes resultantes do fracionamento da radiação solar incidente, ao interagir com a planta (reflexão, absorção e transmissão) vimos que o mais importante do ponto de vista fisiológico e bioquímico para a produtividade da planta é, sem dúvida, a parte absorvida. Entretanto, para a grande maioria dos sistemas de sensoriamento remoto, principalmente, os orbitais e os suborbitais, medir esta parte da radiação é impossível, a não ser através de inferências baseadas no comportamento das quantidades refletidas e/ou emitidas pela vegetação. Neste aspecto, a energia refletida pela vegetação tem sido a mais utilizada porque é nesta faixa do espectro eletromagnético que se dispõe da maior quantidade de sensores orbitais e suborbitais capazes de registrar informações da superfície terrestre.

Gates et al. (1965) relatam que são três os principais mecanismos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas: pigmentos, espaços ocupados pela água e ar e estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente (grãos de amido, mitocôndrias, ribossomos, núcleo e outros plastídeos).

Gausman (1985) comenta que, além dos três mecanismos citados por Gates et al. (1965), a energia refletida pelas folhas é afetada, também, pelo conteúdo de água, maturação ou idade da folha, a posição nodal, condição de iluminação (folhas expostas ao sol e folhas constantemente à sombra), a pubescência e a senescência.

Uma pequena quantidade de luz é refletida pelas células da camada superficial, a maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios incidem frequentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência da radiação forem suficientemente grandes. Dado o grande número de paredes celulares dentro da folha, alguns raios são refletidos de volta na direção da fonte da energia incidente, enquanto que outros são transmitidos através da folha. A radiação eletromagnética contida na faixa de comprimento de onda entre 400 e 3.000 nm (0,4 e 3,0 μm), denominado de espectro reflectivo, apresenta uma curva de reflectância bastante característica, conforme é mostrado na Figura 4.13. Este intervalo de comprimento de onda é dividido em duas regiões distintas, ou seja, região do visível e do infravermelho.

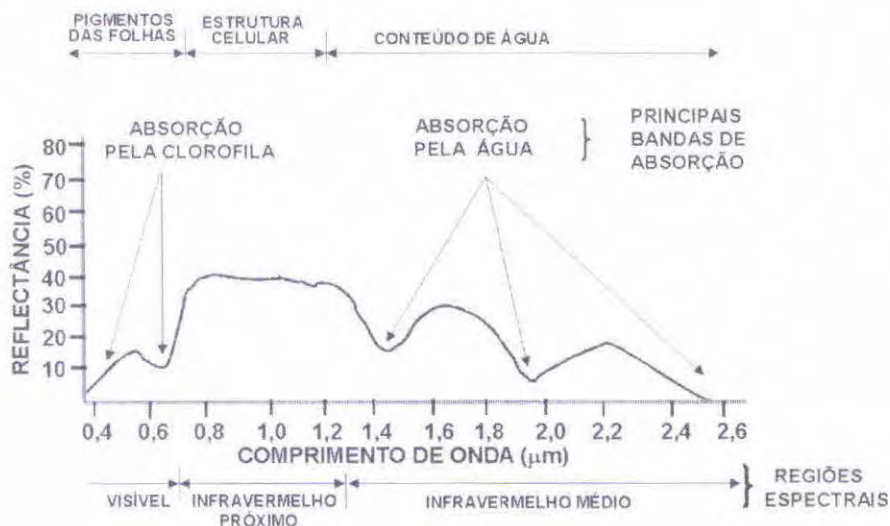


Fig.4.13 – Espectro de reflectância de uma folha de vegetação verde e saudável. FONTE: adaptada de Hoffer (1978).

4.2.2.1- Região do visível

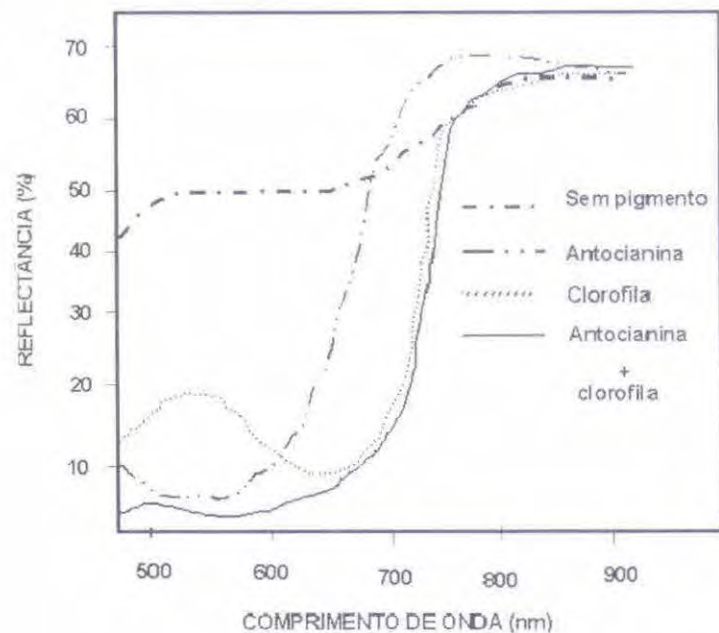
A região do visível compreende toda radiação eletromagnética da faixa espectral de 400 a 700 nm. A maior parte desta radiação que incide sobre o dossel vegetativo é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes no mesófilo das folhas. Os pigmentos são compostos pelas clorofilas "a" e "b", em maior quantidade, e pelos carotenóides, xantofilas e antocianinas.

Nesta faixa espectral, tanto a reflectância quanto a transmitância das folhas são menores do que 15%, porém a reflectância apresenta um pico máximo em 555 nm, conforme é mostrado na Figura 4.13.

No mesófilo a energia é espalhada em virtude das interações da radiação com as paredes celulares hidratadas, originando múltiplas reflexões e refrações, propiciando, assim, uma melhor absorção da radiação pelos pigmentos (Knipling, 1970). Em função das características dos diferentes pigmentos, a absorção da radiação é mais acentuada nos comprimentos de ondas de 480 nm (clorofila "b") e 680 nm (clorofila "a"), passando por uma absorção muito baixa entre 540 a 620 nm, conforme é mostrado na Figura 4.13.

Hoffer e Johannsen (1969), estudando o efeito da presença de diferentes pigmentos nas folhas *Coleus* sobre a reflectância medida na região espectral de 400 a 900 nm, concluíram que folhas sem pigmentação aparente, apresentaram um nível de reflectância muito alto, principalmente, no intervalo de comprimento de onda de 500 a 900 nm. As folhas na quais predominou a antocianina (pigmento avermelhado) tiveram uma baixa reflectância na região espectral do azul e do verde e um aumento marcante na região do vermelho. Nas folhas com clorofilas e antocianina, a reflectância foi baixa em toda a faixa do visível em razão da absorção diferenciada destes dois pigmentos (Figura 4.14).

Fig. 4.14 – Efeito da presença de diferentes pigmentos na reflectância de folha entre 400 e 900 nm. FONTE: Adaptada de Hoffer e Johannsen (1969).



4.2.2.2- Região do infravermelho

A região do infravermelho é constituída de radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda situam-se na faixa espectral entre 700 nm e 1 mm. Didaticamente, esta região é dividida em três partes, a saber: a) infravermelho próximo (700 a 1300 nm), b) infravermelho médio (1300 a 2500 nm) e c) infravermelho distante (2500 nm a 1 mm).

Na região do infravermelho próximo, o comportamento da radiação eletromagnética, quanto à

reflexão, transmissão e absorção, é dominado pelas propriedades ópticas da folha, que dependem das estruturas celulares internas. Além disso, há também uma contribuição indireta do conteúdo de água da folha. Nessa região espectral, a absorção é muito baixa (menos de 15%) e a reflectância pode chegar até 50%, dependendo da estrutura anatômica das folhas (Tucker e Garratt, 1977). No mesófilo foliar, segundo Knipling (1970), Hoffer (1978) e Guyot et al. (1989), ocorrem múltiplas reflexões e refrações da radiação eletromagnética, associadas à descontinuidade entre os índices de refração do ar (1,0) e das paredes celulósicas hidratadas (1,4).

Para esta região do espectro eletromagnético, a evidência do mecanismo de reflexão interna nas folhas é muito forte. Este fato é evidenciado pela drástica redução da reflectância de uma folha infiltrada por água (Figura 4.15). A água preenche as cavidades de ar, formando um meio líquido no interior da folha. Com isso, ocorre uma diminuição das diferenças no índice de refração do ar e da parede celular hidratada na folha, aumentando assim a transmitância da mesma.

Na região do infravermelho médio do espectro eletromagnético a reflectância da vegetação caracteriza-se por um decréscimo dos valores da energia refletida, devido, principalmente, ao conteúdo de água líquida presente na folha. Nessa faixa espectral as bandas de maior absorção da água ocorrem em 1400 nm (1,4 mm), 1900nm (1,9mm) e 2500 nm (2,5mm) (Knipling, 1970; Hoffer, 1978; Guyot et al., 1989), conforme pode ser visto na Figura 4.13.

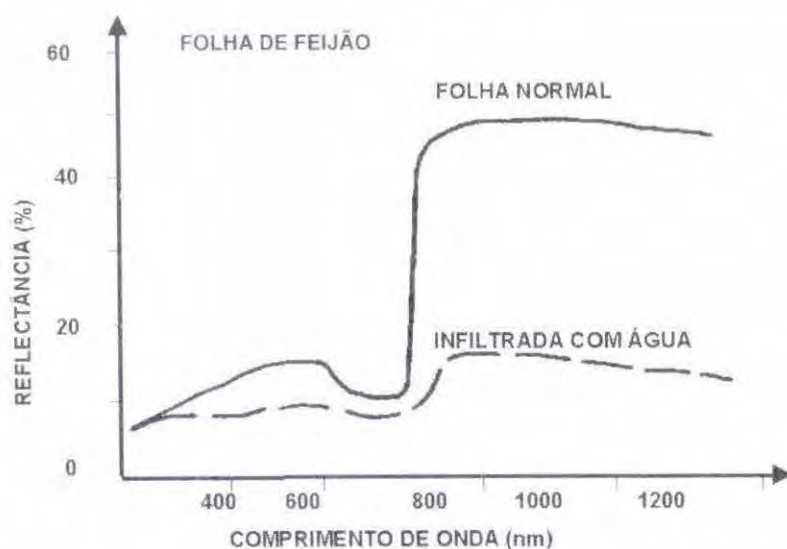


Fig. 4.15 - Mudança na reflectância de folha de feijão provocada pela mudança no conteúdo de água infiltrada. FONTE: Knipling (1970).

A região do infravermelho distante ou termal é caracterizada pela emissão da radiação eletromagnética pelos alvos da superfície terrestre. Do ponto de vista do sensoriamento remoto orbital, esta faixa espectral tem sido pouco explorada para a vegetação, embora o sensor TM do Landsat registre este tipo de radiação na banda 6.

As observações anteriores referentes a uma única folha são fundamentais para o entendimento do comportamento espectral das diferentes coberturas vegetais, mas este padrão não pode ser generalizado para uma planta ou para uma formação vegetal, embora os formatos das curvas sejam semelhantes. A reflectância de uma cobertura vegetal é consideravelmente menor do que as de uma simples folha, devido à atenuação da radiação pela variação do ângulo de incidência da radiação e de visada, devido à arquitetura do dossel (índice de área foliar - IAF e distribuição angular das folhas - DAF), à contribuição de outros elementos do dossel (troncos, galhos, etc.) e à resposta espectral da base do dossel, também chamada de reflectância de fundo (Knipling, 1970; Colwell, 1974; Guyot et al., 1989).

4.3 Fatores Morfológicos e Fisiológicos da Planta envolvidos na Interceptação, Absorção e Reflectância da Luz Solar pelas Folhas

Os fatores morfológicos e fisiológicos da planta, que estão diretamente envolvidos na interceptação e na absorção da radiação fotossinteticamente ativa (energia luminosa), segundo Bernardes (1987), podem ser reunidos em dois grupos: a) aqueles relacionados com a organização espacial dos elementos envolvidos na captação da luz, principalmente as folhas (morfológicos) e b) aqueles de caráter fisiológico ou funcional.

4.3.1 - Fatores Morfológicos

Entre os fatores morfológicos, os mais importantes estão relacionados à organização espacial das folhas, ou seja, densidade de cobertura vegetal, distribuição horizontal e vertical de folhas e ângulo de inserção foliar.

O melhor parâmetro que tem sido usado para estimar a cobertura vegetal é o índice de área foliar (IAF), que é dado pela área foliar existente em relação à superfície do solo ocupada pela planta.

$$\text{IAF} = (\text{área foliar}) / (\text{área do solo}) \quad (4.12)$$

Nas plantas de ciclo curto (em que é mais fácil medir o IAF), entre elas as culturas agrícolas, a taxa de produção de fotossintetizados aumenta em função do aumento do IAF. Entretanto, a absorção da energia luminosa não aumenta indefinidamente com o aumento do IAF, sendo limitada pelo auto-sombreamento que as folhas superiores exercem sobre as inferiores. Em outras palavras, isto quer dizer que existe, para cada planta, um IAF máximo que maximiza a absorção da luz solar. Após o IAF ter atingido o valor suficientemente grande ("máximo") para interceptar aproximadamente toda a radiação fotossinteticamente ativa, maiores aumentos no IAF podem apresentar dois tipos de resposta na taxa de produção fotossintética: uma curva-resposta parabólica indicando um ponto no qual o IAF é ótimo, e outra assintótica, isto é, sem um IAF ótimo, indicando que a planta não atingiu o IAF máximo para absorver o máximo de energia luminosa. Segundo Machado (1985), há evidências de que a maioria das culturas agrícolas apresenta respostas assintóticas. Isto induz a dizer que as culturas agrícolas não atingem um IAF máximo.

A distribuição horizontal das folhas refere-se ao quanto de solo elas cobrirão. A cobertura total de uma área de solo onde estão as plantas poderia ser obtida por uma lâmina contínua de folhas no sentido horizontal. Com isto, toda energia fotossinteticamente ativa que incidisse na área seria absorvida. Entretanto, o arranjo das folhas das plantas depende da densidade de plantio e da disposição das plantas na área. Quanto menor a densidade de plantio, menor é a área do solo exposta. Quanto à disposição, folhas de plantas que se encontram no sentido Norte-Sul recebem menos energia do que aquelas no sentido Leste-Oeste.

A relação entre a largura de uma determinada folha (L) e a distância vertical desta folha até a outra folha que está logo abaixo (D) é outro aspecto que determina o padrão de luz dentro da copa, com a formação de sombra e penumbra nas camadas inferiores ou a passagem direta de luz solar. Segundo Lucchesi (1987), quando $D = 2L$ o aumento de penetração da luz é bastante significativo. Para relações diferentes desta, o aumento é gradativamente menor.

A atenuação da luz a qualquer profundidade da copa pode ser relacionada com o IAF interposto (IAF entre o topo da copa e determinada profundidade no interior da copa) pela lei de Bouguer-Lambert:

$$I = I_0 \text{ EXP} (-K\text{IAF}) \quad (4.13)$$

onde: I_e e I_0 são os fluxos de luz a uma dada profundidade e no topo do dossel respectivamente; IAF é o índice de área foliar do topo até a profundidade desejada e K é o coeficiente de extinção da luz no interior do dossel.

O ângulo de inserção foliar regula o grau de penetração da radiação no interior da copa da planta e, conseqüentemente, num dossel de uma área vegetada (*dossel* é o termo utilizado para caracterizar o conjunto de copas de uma determinada área vegetada). De acordo com o ângulo de inserção da folha no caule, as plantas são classificadas em: erectófilas, planófilas ou intermediárias, ou seja:

- **Inserção erectófila** – o ângulo de inserção das folhas é mais ou menos paralelo ao caule.
- **Inserção planófila** – o ângulo de inserção das folhas é mais ou menos de 90° em relação ao caule.
- **Inserção intermediária** – parte das folhas possui ângulos de inserção erectófila e parte planófila.

As folhas mais erectófilas apresentam menores coeficientes de extinção (permitem maior passagem da luz para as partes internas da copa), resultando numa distribuição da radiação solar incidente num maior IAF, proporcionando maior taxa de fotossíntese. Entretanto, as vantagens da disposição das folhas mais eretas aplicam-se somente para culturas com alta densidade de plantio.

4.3.2 - Fatores Fisiológicos ou Funcionais

Entre os fatores fisiológicos têm-se:

4.3.2.1 - Idade da planta

A capacidade das folhas em realizar fotossíntese aumenta desde a emergência da plântula até a maturidade fisiológica, a partir da qual, a taxa fotossintética declina fortemente até a completa maturação. A fotossíntese, por sua vez, está intimamente relacionada à quantidade de radiação absorvida na região espectral do azul e do vermelho, conforme foi discutido anteriormente. Este fato é manifestado por uma maior reflectância na região do visível (folhas senescentes), conforme é mostrado na Figura 4.16.

Observando a Figura 4.16, nota-se que a radiação refletida pela folha em senescência, na região do visível é maior do que aquela da folha jovem. Em outras palavras, isto implica em menor absorção, que é conseqüência da degradação dos pigmentos (clorofilas) responsáveis pela absorção da energia solar.

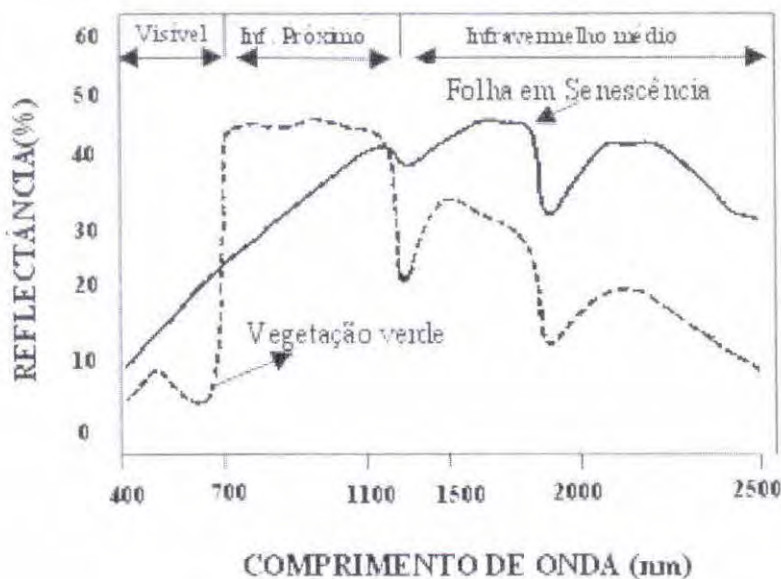


Fig. 4.16 - Curvas de reflectância espectral de folhas verdes e senescentes. FONTE: Guyot (1990).

4.3.2.2 - Déficit hídrico

Quando a planta é submetida a um déficit de água, ocorre no seu interior uma série de reações bioquímicas tentando contornar esta situação. Uma das primeiras conseqüências do déficit hídrico é o fechamento dos estômatos. Com o fechamento dos estômatos, a planta perde menos água, porém diminui a taxa fotossintética, em razão da menor absorção do CO_2 do meio. O efeito do déficit de água é mostrado nas Figuras 4.17 a 4.19.

Observa-se na Figura 4.17 que, para todos os ângulos zenitais, a curva de reflectância das plantas com déficit de água foi sempre maior do que aquela obtida para as plantas irrigadas. Em outras palavras, a absorção da radiação nesta faixa espectral foi mais acentuada para as plantas irrigadas do que para as plantas com déficit de água. Por outro lado, o ângulo zenital também influenciou na quantidade de energia absorvida.

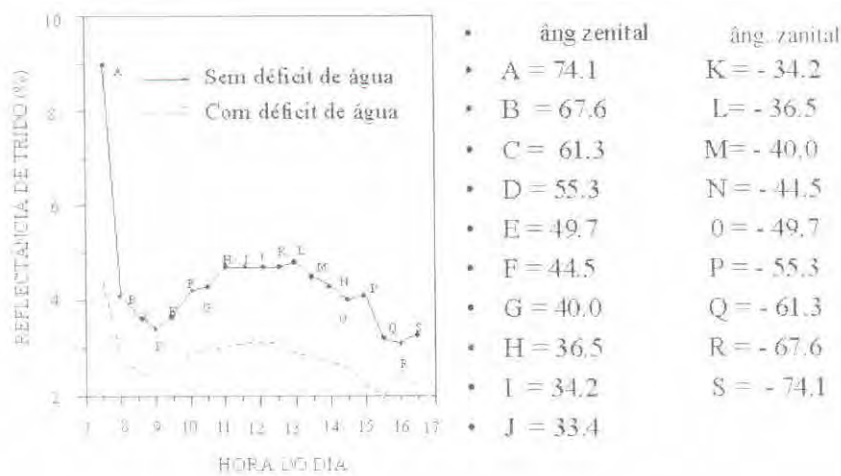


Fig. 4.17 - Reflectância de trigo na região espectral do vermelho (600 a 700 nm), em função do ângulo zenital (hora do dia).

As curvas contidas na Figura 4.18 representam as quantidades de energia interceptada e absorvida ao longo do dia. Nota-se que, em termos de comportamento espectral, elas são muito parecidas. No entanto, a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida apresentou uma curva de resposta bem mais baixa, quando comparada com a obtida para a radiação interceptada. Essa diferença foi maior no período entre 10:00 e 14:00 horas, exatamente quando o ângulo zenital variou de 44,5 a 33,4 graus, conforme foi mostrado na Figura 4.17.

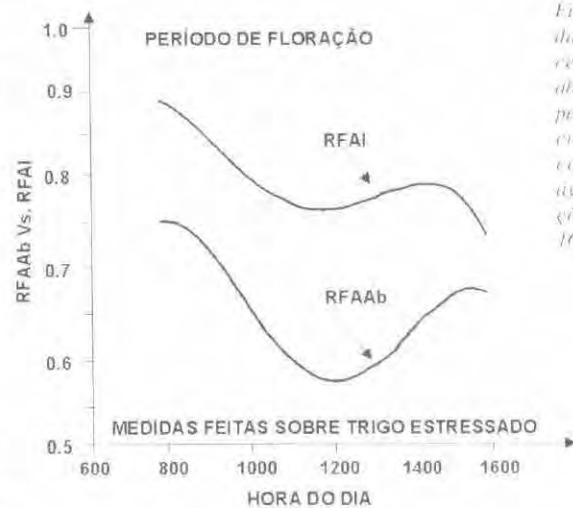
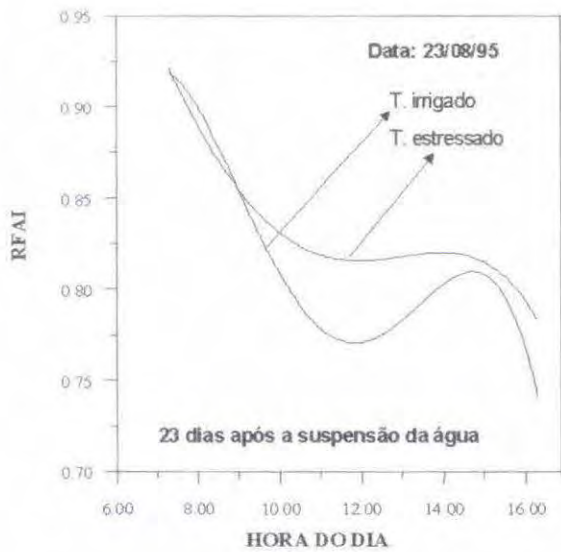


Fig. 4.18 - Curvas da energia interceptada (RFAI) e absorvida (RFAAb) pelo dossel de uma cultura de trigo com estresse de água, com medições entre 7:00 e 16:00 horas.

Na Figura 4.19 são mostradas duas curvas que representam a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI) pela cultura do trigo ao longo do dia, sob duas condições de umidade no solo. O que se observa nestas curvas são duas situações bastante distintas, ou seja, até as 9:00 horas da manhã, não houve diferença marcante na quantidade de energia interceptada pelo dossel do trigo com e sem déficit de água, mostrando que o efeito do estresse de água não é pronunciado em termos de

Fig. 4.19 – Curvas da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI) pelo dossel de uma cultura de trigo irrigado e com déficit de água, medidas das 7:00 horas até às 16:00 horas



interceptação. A diferença é bastante visível a partir das 10:00 horas até, aproximadamente, às 14:00 horas, quando então as curvas aproximam-se novamente. O fato de não ter havido diferença no comportamento das curvas da RFAI no início e no final do dia é explicado pela menor temperatura ambiente que, geralmente, ocorre neste período. A uma temperatura mais baixa as folhas transpiram menos, conseqüentemente, estão mais túrgidas, fazendo com que haja pouca variação no índice de área foliar (IAF), ao passo que entre 10:00 e 14:00 horas as folhas das

plantas estressadas entram no estágio de murcha muito mais acentuado do que as não estressadas, gerando com isto, uma diferença no IAF entre as duas condições de umidade. Além disso, deve-se lembrar da influência ângulo zenital solar que certamente deve ter contribuído para que houvesse essa diferença nas curvas.

4.3.2.3 - Tipo e espessura das folhas

O tamanho e a espessura de uma folha jovem podem ser influenciados pela duração e pelo comprimento de onda da luz; porém, as diferenças na intensidade de luz é que são responsáveis pela variação no tamanho da folha. Dependendo da espécie, quanto maior a intensidade de luz, menor e menos espessa será a folha.

A estrutura interna de uma folha de “sol” é muito diferente da de uma folha de “sombra”, conforme é mostrado na Figura 4.20.

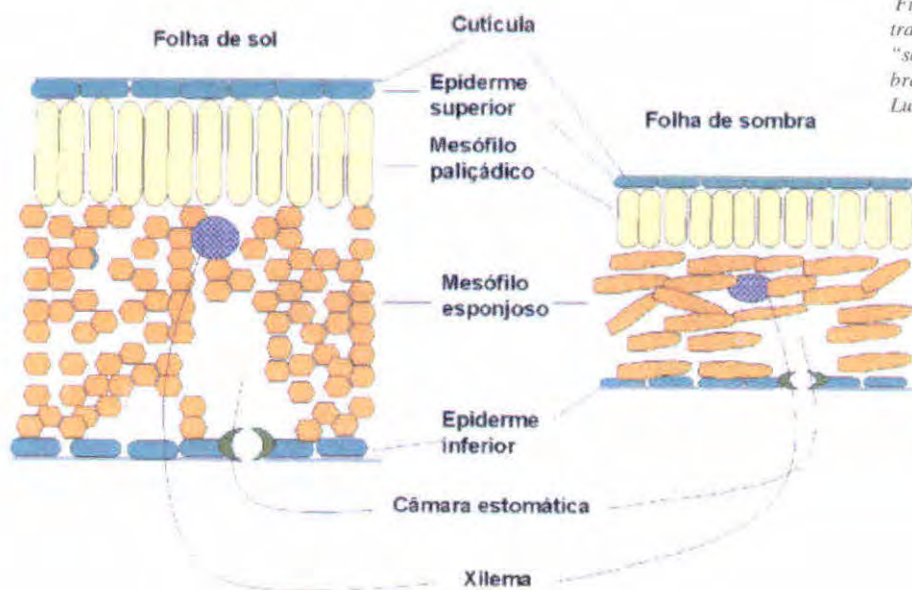


Fig.4.20 – Desenho de cortes transversais de uma folha de “sol” e de uma folha de “sombra”. FONTE: adaptada de Lucchesi (1987).

A anatomia das folhas de sombra, juntamente com suas propriedades fisiológicas, capacita-a para usar baixas intensidades luminosas muito eficientemente, através do aumento do número de centros de reações e de sistemas de antenas (aprisionador), que estão associados ao transporte eletrônico.

As folhas de sol contêm mais camadas de células que as de sombras; as células paliçádicas são mais juntas umas das outras e mais alongadas em direção perpendicular à superfície foliar.

Segundo Guyot (1990), a reflectância de folhas de dicotiledôneas possuem reflectância maior do que as de monocotiledôneas, para uma mesma espessura, porque as primeiras têm um mesófilo esponjoso mais desenvolvido.

4.3.2.4 - Nutrientes

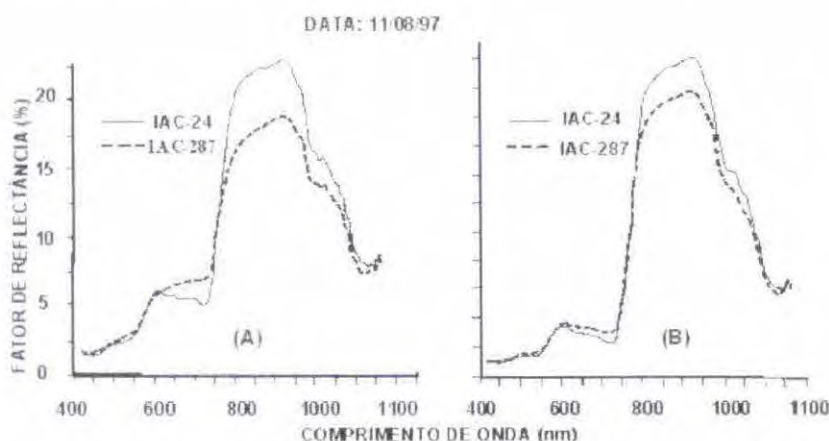
A deficiência de nutrientes na planta, em geral, é provocada pela pobreza do solo em elementos essenciais requeridos para um bom desenvolvimento da mesma. Entretanto, quando há excesso de água em solos com boa drenagem, alguns elementos (por exemplo, o nitrogênio) podem ser arrastados para as camadas mais profundas do perfil do solo, fora do sistema radicular, induzindo uma deficiência nutricional quanto àqueles elementos.

Por outro lado, uma das funções da água no sistema solo/planta é servir de meio de transporte de nutrientes do solo para a planta através da absorção do soluto (água mais nutrientes) pelas raízes. Se há déficit de água no solo, a absorção do soluto é reduzida; conseqüentemente, a planta poderá sofrer uma deficiência nutricional, mesmo que os elementos essenciais estejam no solo.

De acordo com Bernardes (1987), o principal fator que induz o envelhecimento da folha é o conteúdo de nutrientes. Se a planta é submetida ao estresse nutricional, os nutrientes contidos nas folhas mais velhas deslocam-se para as mais novas, provocando a morte prematura das mais velhas.

Ainda com respeito ao conteúdo de nutrientes, é preciso lembrar que o magnésio e o nitrogênio são elementos que participam diretamente na formação da molécula de clorofila. Estes dois elementos fazem parte do núcleo de porfirina, conforme é mostrado na Figura 4.8. Logo, mesmo sendo uma planta jovem, se exposta a um ambiente com deficiência de magnésio e nitrogênio, haverá diminuição na concentração de clorofila, e, conseqüentemente, menor absorção da energia luminosa (Figura 4.21A e B).

Observe que a cultivar IAC-287 é mais sensível à deficiência de nitrogênio do que a cultivar IAC-24, que absorve menos energia luminosa na região do vermelho. Este fato, certamente está relacionado ao menor teor de clorofila em relação à cultivar IAC-24. A sensibilidade das plantas à deficiência de nutrientes varia de espécie para espécie e, até mesmo, entre cultivares de uma mesma cultura, conforme foi mostrado na Figura 4.21.



Al-Abbas et al. (1974) compararam as características espectrais de folhas saudáveis de milho com folhas deficientes em nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, magnésio e cálcio e concluíram que

a deficiência desses nutrientes causou uma redução na concentração de clorofila e na absorção da radiação nos comprimentos de onda de 530 e 640 nm, acompanhada por um acréscimo na reflectância da folha. Uma explicação em termos bioquímicos para a redução na concentração de clorofila e para mudança do comportamento espectral é que esses elementos, ou fazem parte da estrutura da clorofila, como é o caso do nitrogênio e magnésio, ou participam na síntese de enzimas e/ou transporte de energia durante a fotossíntese (Horler et al., 1980 e 1983).

Em plantas cujas folhas apresentam deficiência em fósforo e cálcio, a absorção da energia, na região do infravermelho próximo é menor do que a de folhas sem deficiência. Porém, em folhas deficientes em enxofre, magnésio, potássio e nitrogênio, a absorção é maior do que em folhas normais (Bauer, 1975).

4.3.2.5 - Conteúdo de água na folha

A influência da água na reflectância da folha, em comprimentos de onda abaixo de 1300 nm, tem recebido pouca atenção (Bowman, 1989; Hunt e Rock, 1989; Carter, 1991). A absorção da radiação solar pela água é pouco pronunciada entre 700 nm a 1300 nm e, menos ainda, entre 400 nm a 700 nm. Carter (1991) denomina isto de efeito secundário, porque não pode ser explicado somente pela propriedade absorptiva da água e devem ser incluídas influências de outros componentes das folhas, como os pigmentos. Bauer et al. (1980) e Ripple (1985) atribuem o efeito secundário do conteúdo de

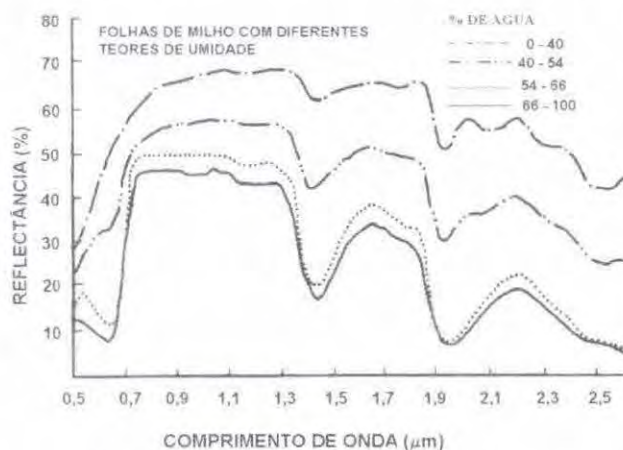


Fig. 4.22 - Curvas da reflectância espectral, obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água. FONTE: Hoffer (1978)

apresentar um conteúdo de água superior a 75%. Afirmarções semelhantes são encontradas em Horler et al. (1983). A Figura 4.22 ilustra curvas de reflectância espectral, obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água.

Para enfatizar ainda mais a influência da água na reflectância da folha, a seguir é mostrado mais um exemplo (Figura 4.23). Neste exemplo, nota-se que a curva de reflectância da folha, no infravermelho médio (1300 a 2500 nm), é inversamente proporcional à absorção de energia.

água nas folhas às variações na concentração de clorofila e desarranjo nas estruturas internas da folha. Segundo os autores, a redução do conteúdo de clorofila nas folhas propicia uma menor absorção de energia na região do visível, conseqüentemente, aumentando a reflectância nesta faixa espectral. Por outro lado, na região do infravermelho próximo, a reflectância aumenta em conseqüência de mudanças nas estruturas internas da folha. Segundo ainda os autores, as mudanças na reflectância não são substanciais enquanto o turgor das folhas

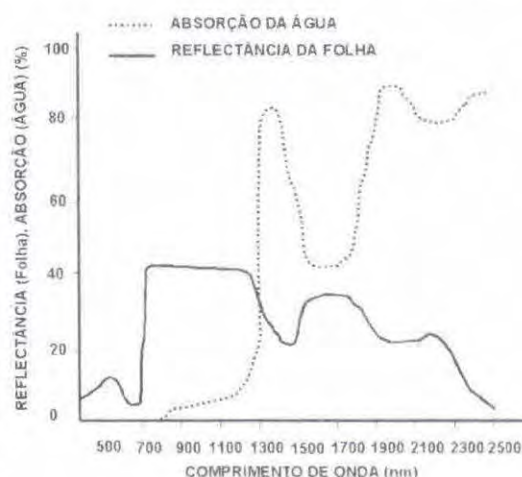


Fig. 4.23 - Relação inversa entre a reflectância de uma folha e a absorção pela água. FONTE: Adaptada de Hoffer (1978).

4.4 Interação da Radiação Solar com o Dossel Vegetariano

Até este ponto, tudo o que foi discutido sobre a interação da radiação eletromagnética com a vegetação teve um enfoque bastante direcionado à folha. Entretanto, quando se pretende utilizar o sensoriamento remoto para obter informações a respeito da cobertura vegetal de uma região da superfície terrestre, é preciso levar em consideração a interação da energia solar com a *comunidade de plantas*. As comunidades podem ser quase homogêneas, como áreas agrícolas (por exemplo, a cultura do trigo) ou comunidades bastante heterogêneas, como no caso de uma área ocupada por uma mata natural, onde se têm árvores de diferentes portes e espécies. Na Figura 4.24 é mostrada uma situação de uma comunidade de plantas homogênea (primeiro plano) e de uma comunidade heterogênea (plano superior).



Fig. 4.24 – Uma comunidade homogênea (cultura do trigo) e uma comunidade heterogênea (mata natural).

É importante salientar que mesmo sendo uma comunidade bastante homogênea, sempre há outros tipos de vegetação que ocupam o estrato inferior do solo e que disputam com as plantas predominantes, em certas fases do ciclo de crescimento e desenvolvimento, água e nutrientes do solo.

O *dossel vegetativo* é o conjunto de todas as copas da vegetação, numa determinada área, independente da espécie.

Outra definição de *dossel vegetativo ou da vegetação* seria tudo aquilo que compõe a parte aérea de uma comunidade de plantas e que, portanto, está envolvido diretamente com as interações da energia solar (Assunção, 1989). Um dossel é caracterizado pelos seus componentes, sua organização e sua estrutura.

A interação da radiação solar com dosséis vegetativos se dá, principalmente, através dos pigmentos contidos nas folhas. Logo, tudo aquilo que foi discutido sobre as propriedades ópticas da folha é válido, até certo ponto, para dossel de vegetação, uma vez que a folha é o principal componente do mesmo. Tanto a arquitetura da folha quanto da planta está adaptada para um melhor aproveitamento da radiação solar no processo da fotossíntese. Como a folha é o principal elemento de captação da radiação solar, observa-se uma predominância maior da área foliar quando comparada à área de outros

componentes da planta. Esta predominância é tão marcante que, normalmente, outros órgãos que também podem realizar fotossíntese, são desprezados em estudos sobre produção de fotoassimilados.

O entendimento da interação da radiação solar com os dosséis vegetativos tem sido bem explorado em culturas agrícolas, que por serem de portes mais baixos e de ciclo mais curto, torna mais fácil de medir os componentes da energia refletida e transmitida no dossel.

De acordo com a porcentagem de cobertura do solo pelas plantas, o dossel pode ser classificado em duas categorias: dossel incompleto e dossel completo.

O dossel é considerado incompleto quando apresenta baixa porcentagem de cobertura do solo, como é o caso de uma cultura agrícola no início do desenvolvimento vegetativo. Nesta fase de crescimento da cultura, a energia refletida da área é composta de uma parte proveniente das plantas e outra do solo onde foi implantada.

À medida que a vegetação ou a cultura atinge o seu desenvolvimento máximo, o dossel é definido como sendo completo, correspondendo a uma cobertura vegetal próximo a 100%. Entretanto, os dosséis de certas culturas tais como: citrus e café, por exemplo, apresentam dosséis incompletos mesmo em condições de máximo desenvolvimento, pois a contribuição do solo na reflectância desses dosséis é muito grande, devido ao grande espaçamento entre plantas.

Com relação à distribuição das folhas no dossel, Ponzoni (1994) e Cardoso e Ponzoni (1996) comentam que os dosséis podem ser descritos por um dos seguintes tipos de distribuições angulares das folhas: planófilo, erectófilo, plagiófilo, extremófilo, uniforme e esférico.

A radiação eletromagnética, ao incidir no dossel vegetativo, fica sujeita a dois processos físicos: espalhamento e absorção. A razão entre o fluxo espalhado e o fluxo total incidente é chamada de "albedo" (r).

O albedo varia com o tipo de alvo sobre o qual incide a radiação eletromagnética. Como exemplo, na Tabela 4.3 são mostrados alguns valores de albedos obtidos de diferentes alvos da superfície terrestre.

Tabela 4.3 - Albedo para algumas superfícies

SUPERFÍCIES	ALBEDO (%)	SUPERFÍCIE	ALBEDO (%)
Concreto	22	Beterraba açucareira	26
Solo arado úmido	15	Cevada	24
Asfalto	7	Trigo	24
Areia branca	37	Milho	20
Solo Escuro	10	Feijão	24
Solo claro	27	Tomate	23
Água	5	Abacaxi	15
Gramma	24	Sorgo	20
Batata	20	Algodão	21

FONTE: adaptada de Merva (1995).

O processo de espalhamento em si pode ser ainda dividido em dois sub-processos: reflexão e transmissão. O destino da radiação que incide num dossel vegetativo depende de suas características como comprimento de onda, ângulo de incidência e polarização, além das características do dossel e, em última análise, das folhas que compõem o dossel.

Em se tratando de culturas agrícolas, Richardson et al. (1975) e Kollenkark et al. (1982) comentam que os dosséis de culturas exibem, no campo de visada do sensor, quatro componentes

com diferentes propriedades de reflectância óptica: a) vegetação iluminada, b) solo iluminado, c) vegetação sombreada e d) solo sombreado. A magnitude de cada um destes componentes varia com a cobertura vegetal, orientação e espaçamento das fileiras, morfologia do dossel, estrutura interna dos elementos que compõem o dossel, diâmetro da copa da planta, altura da planta, teor de água na planta e no solo, condição fitossanitária, ângulo zenital e azimutal do sol, latitude e tamanho do elemento de resolução do equipamento utilizado (Kollenkark et al., 1982).

Em cultura de trigo com 70% de cobertura vegetal, Jackson et al. (1979), estudando as influências do ângulo zenital e orientação das fileiras de plantio, no comportamento espectral da cultura, comentam que, no decorrer do dia, os alinhamentos norte-sul apresentaram variações na reflectância de até 230%, na faixa espectral correspondente ao vermelho.

Kollenkark et al. (1982), trabalhando com a cultura de soja, plantada em nove diferentes orientações de fileiras, obtiveram grandes variações na reflectância na região do vermelho (até 140%), para as parcelas com orientação norte-sul, quando a cobertura do solo foi de 64%.

Na região do infravermelho próximo, o sombreamento não é tão pronunciado como na região do visível, devido ao múltiplo espalhamento e à baixa absorção por pigmentos nesta faixa do espectro (Colwell, 1974; Daughtry et al., 1982).

A morfologia das folhas que compõem o dossel vegetativo exerce forte influência na reflectância. Pinter Jr. et al. (1985) mediram a reflectância em dosséis e em folhas isoladas de diferentes cultivares de trigo, que tinham a mesma fitomassa e índice de área foliar verde. Os autores verificaram que, independentemente do cultivar, não houve diferença na reflectância, quando medida em folhas isoladas. Entretanto, para essas mesmas cultivares, as reflectâncias foram diferentes quando medidas sobre os diferentes dosséis.

Com relação à estrutura interna dos elementos do dossel, o mesófilo de folhas de gramíneas apresenta, como regra, ausência de diferenciação entre parênquima paliçádico e esponjoso (mesófilo compacto). No entanto, abaixo das duas camadas epidérmicas, há fileiras de células que apresentam organizações mais regulares do que as do restante do mesófilo. Elas possuem esclerênquima bastante desenvolvido e, comumente, apresentam fibras em placa longitudinal que se estende dos feixes vasculares maiores em direção à epiderme. Gausman e Allen (1973), estudando o mesófilo de plantas cultivadas, observaram que as menores reflectâncias no comprimento de onda de 1000 nm foram obtidas, em dosséis, cujo mesófilo das folhas era compacto, concordando com a natureza da reflectância do infravermelho próximo, descrita por Knipling (1970). Entretanto, nos estudos de Gausman e Allen (1973), sobre medidas de reflectância em dosséis de trigo, cana-de-açúcar e milho, os autores comentam que o dossel do trigo apresentou-se como uma exceção, mostrando uma reflectância comparável à de folhas dorsiventrals. Examinando a microfotografia do corte transversal de folhas de cana-de-açúcar, trigo e milho, os autores verificaram que o mesófilo do trigo é bem mais poroso do que o da cana-de-açúcar e do milho.

A reflectância de dosséis agrícolas, nas regiões do visível e infravermelho próximo, é indiretamente afetada pelo turgor celular (Myers, 1970). Quando uma cultura sofre um estresse de água (reduzindo seu turgor celular), as mudanças iniciais da reflectância são mais pronunciadas na região do visível do que no infravermelho próximo, devido à sensibilidade da clorofila a distúrbios fisiológicos. Porém, a detecção das condições de estresse se baseia não na mudança da reflectância de folhas individuais, mas na redução da área foliar total exposta ao sensor, por perda direta de folhas, mudança de sua orientação, ou ainda da supressão do crescimento da planta. Nesses casos, a reflectância do infravermelho próximo tende a ser reduzida relativamente mais do que a do visível, por causa da redução do realce do infravermelho próximo ou por aumento da exposição do solo (Knipling, 1970).

Ainda com relação ao estresse provocado pela água, foi mostrado no item 4.4.3.4, que alguns autores tais como Bauer et al. (1980), Ripple (1986) e Horler et al. (1983) afirmam que a reflectância no infravermelho próximo aumenta em plantas com estresse hídrico. Para ilustrar o que foi dito pelos autores, foi mostrado um gráfico de curvas espectrais de folhas de milho com diferentes conteúdos de

água. Entretanto, essas afirmações não deixam de ser verdadeiras, se se levar em conta o estágio de desenvolvimento em que a planta sofreu o estresse hídrico. Quando a planta sofre um estresse hídrico no início do desenvolvimento vegetativo, essas afirmações podem não condizer com a realidade. Na Figura 4.25, são mostradas curvas de reflectância obtidas sobre dosséis da cultura do trigo que foi submetido ao estresse hídrico em diferentes estádios de crescimento e de desenvolvimento. Segundo Moreira (1997), no experimento que deu origem a estas curvas contidas na Figura 4.25, os tratamentos consistiram da testemunha e da suspensão da irrigação em quatro fases distintas do ciclo da cultura, a saber:

- Suspensão da irrigação quando as plântulas apresentaram três folhas. A cultura ficou sem receber água por um período de 29 dias.
- No início do emborrachamento até o final do espigamento (31 dias sem água).
- Início do florescimento até o final do enchimento de grãos (24 dias sem água)
- Início da maturação fisiológica (13 dias sem água)

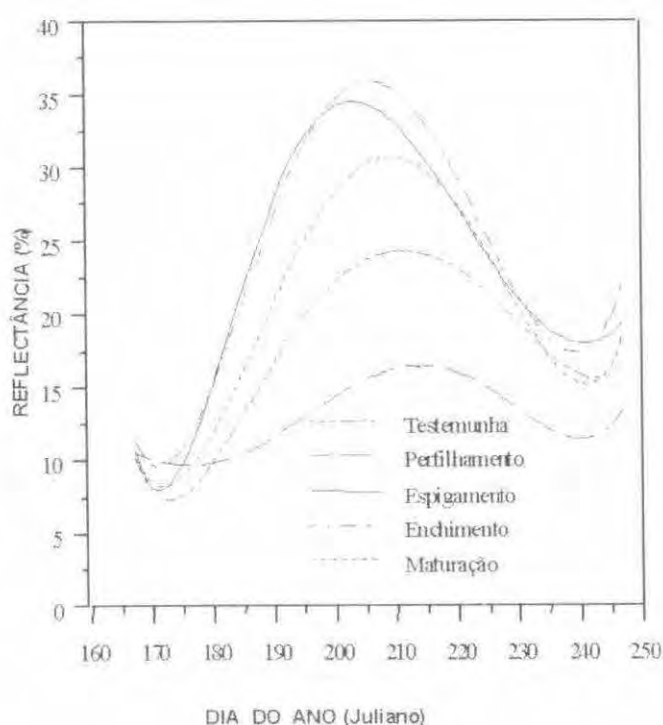


Fig. 4.25 – Curvas de reflectância de dosséis de trigo obtidas em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. FONTE: Moreira (1997).

Quando o estresse hídrico foi aplicado nas plantas de trigo já desenvolvidas (estádios de espigamento, enchimento e maturação) a reflectância, no infravermelho próximo, do dossel das áreas com déficit de água foi maior do que aquela observada para a testemunha. Entretanto, quando a suspensão da irrigação foi no início do desenvolvimento da cultura, a reflectância no infravermelho próximo foi menor do que a testemunha, durante todo ciclo da cultura.

Diante desta situação, podemos afirmar que a reflectância no infravermelho próximo será maior ou menor, dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura. Mesmo assim, esse resultado está de acordo com as afirmações de Knipling (1970) e de Bauer et al. (1980), Ripple (1986) e Horler et al. (1983). Entretanto, é preciso estar ciente da época em que a cultura sofreu o estresse hídrico.

Ripple (1986) comenta que as relações entre o teor de água na folha e a reflectância nas regiões do visível e do infravermelho próximo não são diretas. Geralmente, em plantas sob estresse hídrico, ocorre uma diminuição na concentração de clorofila provocando um desarranjo nas estruturas internas. Com isto, folhas sob estresse hídrico têm maior reflectância no vermelho (menor absorção) e no infravermelho próximo.

Além da reflectância descrita, segundo os mecanismos comentados anteriormente, Vanderbilt e Grant (1983) definem uma outra forma de reflectância chamada de reflectância especular, que se origina na cutícula das folhas. A cutícula das folhas é estratificada e, freqüentemente, apresenta estruturas cerosas. Nas folhas de trigo ocorrem estruturas aciculares irregulares distribuídas sobre uma superfície cerosa plana. Dependendo da geometria de aquisição dos dados espectrais, a reflectância especular pode ser significativa. Neste caso, a reflectância observada não corresponde somente à interação da radiação com o mesófilo, resultando num erro devido à diferente composição espectral da radiação refletida de forma especular.

É importante salientar que, na região do infravermelho próximo, a quantidade de radiação refletida por várias camadas de folhas é bem maior do que a refletida por uma única folha. Isto ocorre devido a um fenômeno, denominado por Knippling (1970), de fator de compensação e por Hoffer (1978), de reflectância aditiva. Este efeito foi demonstrado na prática por Myers (1970), estudando a reflectância de folhas de algodão nas faixas do visível e infravermelho próximo (Figura 4.26).

Observe que, na região do visível, o efeito de camada de folha não altera os valores da reflectância, como ocorre no infravermelho próximo e médio.

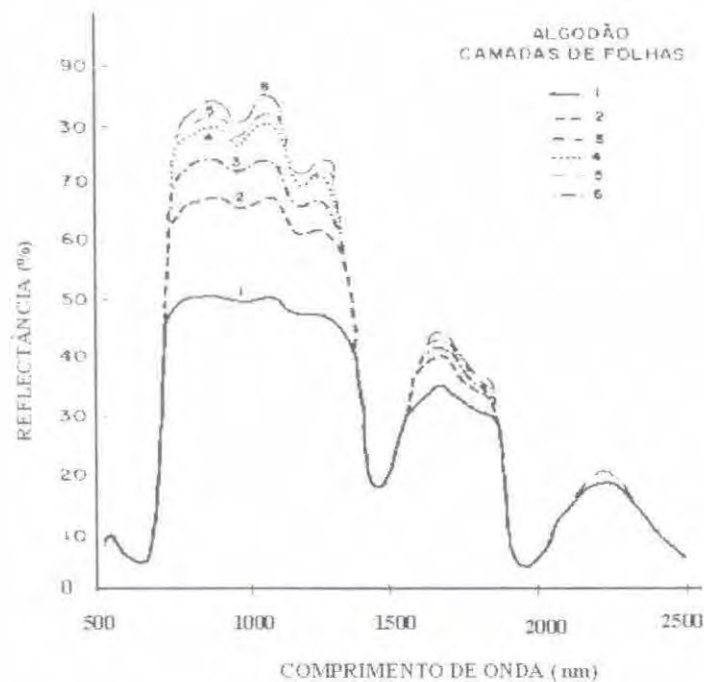


Fig. 4.26 - Reflectância de folhas de algodão superpostas.
FONTE: Myers (1970).

Capítulo 5

Noções básicas sobre a água e sua interação com a radiação solar

A água é um bem tão precioso para os seres vivos que está presente em todas as partes, quer seja no estado sólido, líquido ou gasoso. Sem a água a vida na Terra não seria possível como a conhecemos. Os organismos vivos originaram-se em meio aquoso e se tornaram dependentes dele no decurso de sua evolução. Nos seres vivos, a água é um dos constituintes do protoplasma, em proporções que pode chegar a 95% ou mais do seu peso total. Dentro do protoplasma a água participa de reações metabólicas tais como a fotossíntese e a fosforilação oxidativa. Por outro lado, como solvente universal, possibilita uma série de reações. Nas plantas tem ainda a função de manter o turgor celular, responsável pelo crescimento vegetal.

Do ponto de vista do sensoriamento remoto, o conhecimento de suas propriedades físicas é essencial para entender sua influência no comportamento espectral dos demais alvos da superfície terrestre.

5.1 Estrutura Molecular da Água

A água resulta da combinação de dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio, através da ligação química denominada covalente. Isto é, o hidrogênio, que contém apenas um elétron girando em torno do núcleo, é instável na forma atômica (como átomo); por isso, é encontrado na natureza sempre combinado com outro elemento químico ou com outro átomo de hidrogênio, na forma molecular.

Por outro lado, o oxigênio possui no último nível de energia (orbital) seis elétrons. Na forma atômica também é instável e receptor de elétrons. Para adquirir a estabilidade eletrostática, o oxigênio precisa receber dois elétrons e o hidrogênio um elétron, já que ele também não pode doar o único elétron que tem. Assim, para formar a molécula de água, o hidrogênio e o oxigênio compartilham de um par eletrônico que satisfaz tanto o átomo de hidrogênio quanto o átomo de oxigênio. Esse tipo de ligação é denominado covalente, sendo que o par eletrônico gira ora em torno do átomo de oxigênio, ora em torno do hidrogênio, conforme é mostrado na Figura 5.1.

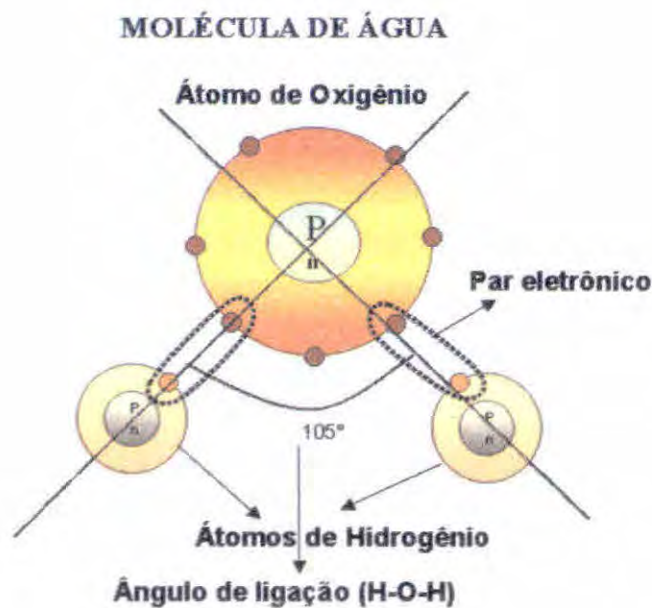


Fig.5.1 – Esquema de uma molécula de água para mostrar o par eletrônico formado pelos elétrons dos átomos de hidrogênio e oxigênio, onde p e n são os prótons e elétrons, respectivamente.

Como o átomo de oxigênio é bem maior do que o átomo de hidrogênio, o par eletrônico gira mais próximo do primeiro do que do segundo. Essa maior proximidade do par eletrônico ao átomo de oxigênio gera uma polaridade na molécula de água, ou seja, o átomo de oxigênio fica com uma pequena carga negativa e o hidrogênio com uma pequena carga positiva, tornando assim, a molécula de água polar. Por esta razão a ligação química que ocorre entre o hidrogênio e o oxigênio é dita *covalente polar*.

O ângulo com que os átomos de hidrogênio se dispõem em torno do átomo de oxigênio é de 105°, conforme é mostrado na Figura 5.1.

5.2 Interação da Radiação Eletromagnética com a Água

Na temperatura ambiente, a água é encontrada em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. Em cada um desses estados físicos, a absorção da radiação eletromagnética ocorre de maneira diferente uma da outra. Na Figura 5.2 pode-se observar as curvas de reflectância da água na forma de nuvens, neve e líquida (Bowker et al., 1985).

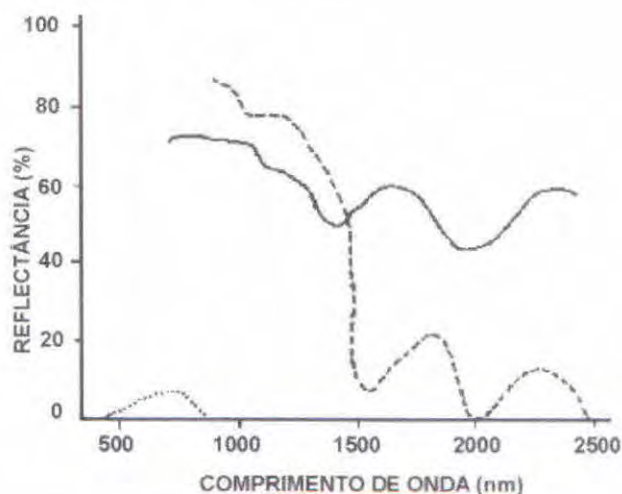


Fig.5.2 – Curvas de reflectância da água nos estados líquido, vapor (nuvem) e gelo (neve).
 FONTE: Adaptada de Bowker et al. (1985).

Observando as curvas de reflectância da Figura 5.2 pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A água líquida absorve toda a radiação eletromagnética abaixo de 380 nm e acima de 700 nm. Nesta faixa espectral, ou seja, onde a reflectância é zero, a absorção é total. Veja que mesmo na faixa espectral entre 380 nm e 700 nm, a reflectância da água na forma líquida é relativamente pequena, ultrapassando pouco mais de 5%. Este fato demonstra que a água, no estado líquido, é um forte absorvedor da radiação em quase todas as faixas do espectro eletromagnético.

- A água na forma gasosa apresenta elevada reflectância, em torno de 70%, para todas as radiações eletromagnéticas contidas no espectro óptico (400 a 2500 nm). Entretanto, nota-se que ocorrem bandas de maior absorção em 1000, 1300 e 2000 nm.

- A curva espectral da reflectância da água na forma de neve até 1200 nm é maior do que a curva de reflectância da água no estado gasoso. De 1200 nm a 2500 nm há um decaimento na curva, indicando uma absorção acentuada da energia nesta região espectral. Percebe-se ainda que, nos comprimentos de onda de 1500 nm e de 2000 nm ocorre a maior absorção da radiação, sendo que em 2000 nm a absorção é máxima, chegando a reflectância a um valor aproximado de zero.

Nas folhas verdes a água contida nas células e nos espaços intracelulares apresenta picos de absorção em 1300, 1750 e 2100 nm, conforme foi discutido no capítulo anterior. Por esta razão, o comportamento da água no interior das folhas verdes, em termos de absorção de energia, é muito semelhante à absorção da energia pela água nas formas sólidas e gasosas.

5.3 Fatores que Interferem na Reflectância da Água

A energia solar que é absorvida pela massa de água é, em parte, devida às moléculas e aos elétrons da própria massa de água e, em parte, devida às partículas nela dispersas.

O fitoplâncton e a matéria orgânica nos ecossistemas aquáticos apresentam estreita relação com a água, pois sua distribuição depende fundamentalmente da movimentação e densidade das massas de água (Mantovani, 1993). Esses elementos são responsáveis por parte da absorção e espalhamento da radiação solar e determinam, até certo ponto, as propriedades ópticas da água.

Segundo Cabral et al. (1990), o fitoplâncton é responsável pela produção de matéria orgânica, através da utilização de nutrientes inorgânicos e energia solar (fotossíntese). A matéria orgânica dissolvida na água é responsável pela cor amarelo-marrom da água.

Os compostos húmicos presentes na matéria orgânica são classificados segundo suas solubilidades em água, que é função da acidez do meio líquido. Ácidos húmicos são aqueles solúveis em meio básico (pH > 7,0) e insolúveis em meio ácido (pH < 7,0). Ácidos fúlvicos são aqueles solúveis em qualquer acidez do meio e a humina são os compostos húmicos insolúveis (Esteves, 1988). A presença destes compostos na água produz bandas de absorção fortes no ultravioleta, decrescendo quase exponencialmente até o verde e com valores baixos no vermelho (Carder et al., 1989). Na Figura 5.3 estão contidas curvas de absorção da energia solar por soluções de ácidos húmicos preparados em laboratório e de amostras filtradas de água de diferentes ecossistemas aquáticos, onde se nota a grande semelhança entre elas.

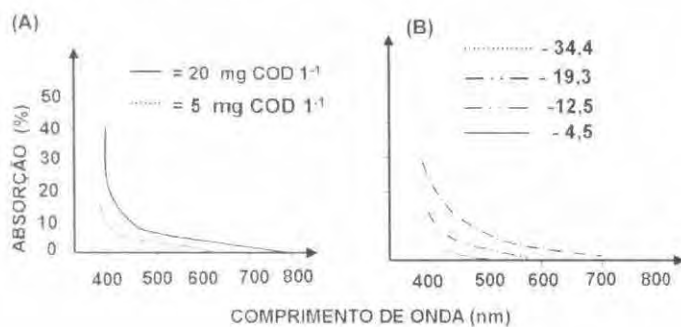


Fig. 5.3 – Comparação entre curvas de absorção de ácidos húmicos (A) e amostras de material orgânico dissolvido em água (B).
FONTE: adaptada de Witte et al. (1982).

À medida que aumenta a concentração da matéria orgânica na água, diminui a reflectância da mesma (aumento da absorção) em todo espectro do visível. Isso ocorre mais acentuadamente para a radiação eletromagnética situada na região espectral do azul e do vermelho (Mantovani, 1993).

Partículas minerais inorgânicas, provenientes de rochas e solos, que são carregadas para os corpos d'água, por ação do vento, da chuva, da ressuspensão e erosão do fundo, também interferem na absorção da energia pela massa de água. Segundo Sturm (1980), a distribuição granulométrica destes materiais é o parâmetro mais importante no espalhamento da radiação em águas naturais. Novo et al. (1989) analisaram dois tipos de material inorgânico com coloração e granulometria diferentes e observaram uma maior reflectância da água que continha material claro e de granulometria menor. Observaram, ainda, que este material promovia uma forte diminuição na amplitude dos espectros de reflectância das amostras, principalmente nas faixas do vermelho e infravermelho próximo, conforme é mostrado na Figura 5.4.

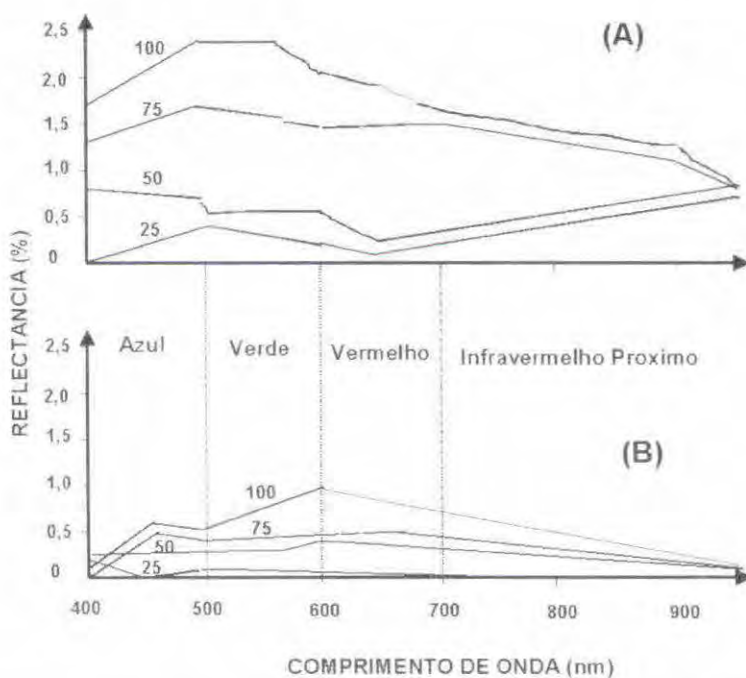


Fig. 5.4 – Reflectância residual de suspensões de material inorgânico (A) material branco, partículas entre 1 e 20 µm de tamanho, nas concentrações de 25, 50, 75 e 100%. (B) material vermelho com partículas entre 7 e 37 µm de tamanho e nas mesmas concentrações de (A). FONTE: Novo et al., 1989.

Outro exemplo para mostrar o efeito de concentrações de material inorgânico em suspensão, pode ser visto na Figura 5.5 (Steffen et al., 1992). Neste estudo, os autores mediram a reflectância da água em três pontos distintos: a) no reservatório de Barra Bonita, formado pelos rios Piracicaba e Tietê, Estado de São Paulo; b) no rio Tietê e c) no rio Piracicaba. Os autores chegaram às seguintes conclusões:

- A reflectância da água do rio Tietê é típica de água com elevada concentração de material inorgânico em suspensão, com acentuada reflectância na faixa do vermelho, indicando baixa absorção da energia nesta região espectral.
- A água do rio Piracicaba apresenta uma reflectância bastante baixa, com pico de máxima reflectância na região do verde ($\pm 23\%$). Este fato, é um forte indicador da presença de material orgânico em suspensão.
- A reflectância da água, obtida no corpo central do reservatório de Barra Bonita, onde as águas dos dois rios já estão misturadas, mostra claramente a transição entre os dois espectros anteriores.

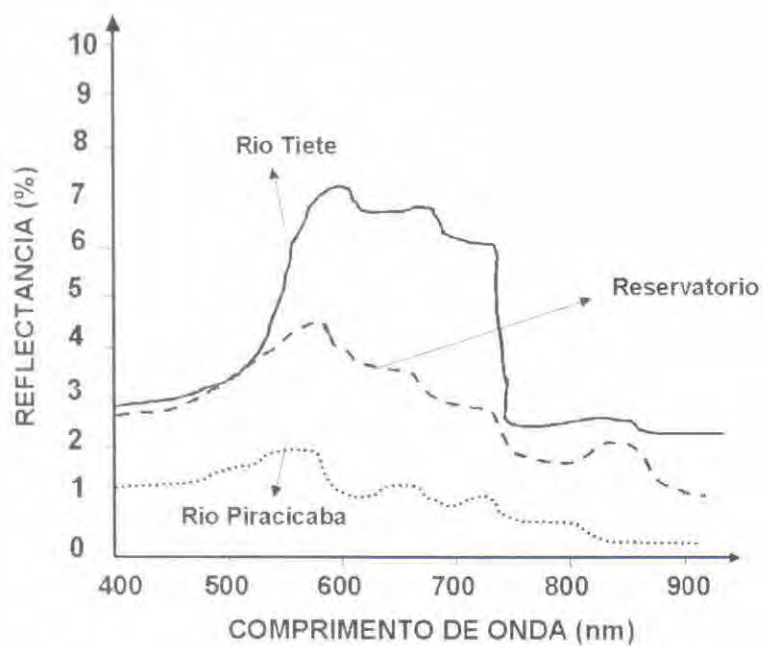


Fig.5.5 – Curvas de reflectância da água obtidas nos rios Tietê e Piracicaba e no reservatório de Barra Bonita, Estado de São Paulo. FONTE: adaptada de Steffen et al. (1992).

Capítulo 6

Sistemas sensores

Nos capítulos anteriores, vimos que a radiação eletromagnética interage com os alvos da superfície terrestre podendo ser absorvida, refletida, transmitida e emitida por eles seletivamente. Vimos também os fatores ambientais e os inerentes a cada alvo que interferem nas proporções de cada componente resultante dessa interação. Em outras palavras, procurou-se mostrar que a interação da radiação eletromagnética com os alvos na superfície da Terra é com o próprio solo depende, sobretudo, das características do alvo e do meio ambiente que os cercam. Por exemplo, a quantidade de energia refletida por uma planta é função de características intrínsecas desta, mas que pode ser alterada se a planta for submetida a estresses, tais como: desequilíbrio nutricional, déficit hídrico, ataque de pragas e doenças, efeitos climáticos adversos, etc. Aliado a isso, tem-se as condições do meio ambiente, responsáveis pela atenuação da energia, durante o percurso da radiação do alvo até o local onde é quantificada.

Conhecendo o comportamento espectral da radiação refletida e/ou emitida por uma determinada espécie vegetal, digamos uma cultura agrícola, sadia e adequadamente suprida de água e nutriente, é possível identificar, através de dados coletados por sensoriamento remoto, outras áreas ocupadas por essa mesma espécie e nas mesmas condições fitossanitárias; ou áreas dessa mesma espécie vegetal, que estejam sob condições de algum tipo de estresse, através de anomalias apresentadas no comportamento espectral. Para ilustrar o que foi dito acima, na Figura 6.1 são mostradas duas curvas de reflectância, obtidas de dosséis de dois cultivares de trigo submetidos ao déficit hídrico. Uma curva espectral é proveniente do cultivar IAC-24 e a outra do cultivar IAC-287. Observe que embora sendo as dois cultivares pertencentes à espécie *Triticum aestivum*, L, o cultivar IAC-24 é mais resistente ao déficit hídrico do que o IAC-287, pois apresenta menor reflectância na região do vermelho (maior absorção da radiação solar) e maior reflectância no infravermelho próximo.

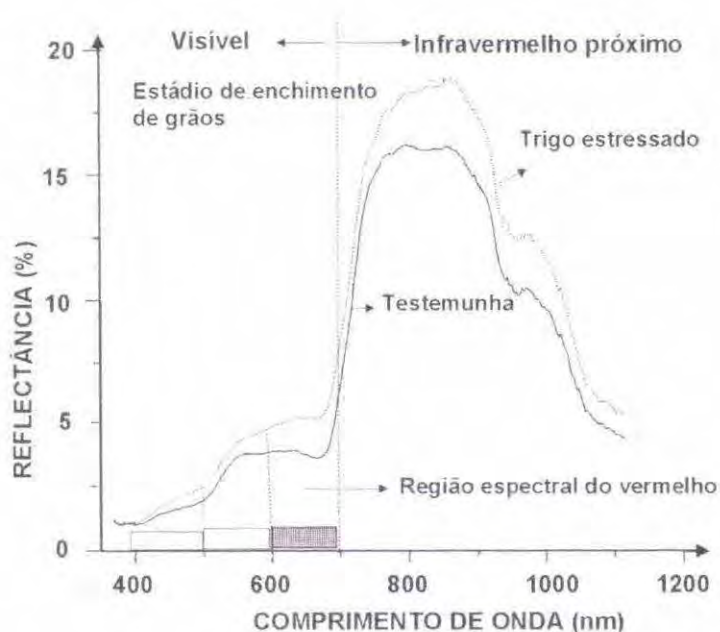


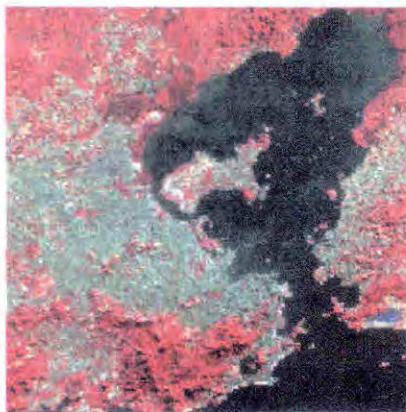
Fig.6.1 - Curvas de reflectância espectral do trigo para mostrar a influência do déficit hídrico sobre a absorção de energia solar na região do vermelho e no infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

Embora sendo a mesma cultura, isto é o trigo, podemos observar, pelas características das curvas, que as plantas sob efeito de déficit hídrico apresentam uma maior quantidade de energia refletida em toda região do visível e do infravermelho próximo. Na região do visível, nota-se que o maior afastamento das duas curvas ocorreu na região do vermelho (600 a 700 nm). Isto de certa forma, demonstra que, através das medidas do fator de reflectância da cultura do trigo, é possível identificar um fenômeno ambiental que está ocorrendo na área cultivada, que neste caso, é o déficit hídrico.

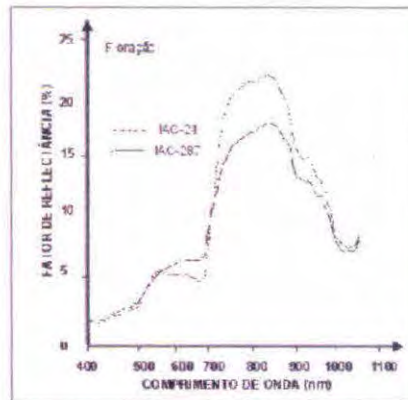
No presente estágio de desenvolvimento tecnológico é possível medir com razoável precisão e à distância, as propriedades espectrais dos alvos e fenômenos da superfície terrestre. Essas medidas são obtidas através de dispositivos denominados sistemas sensores.

6.1 Caracterização dos Sistemas Sensores

Sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro eletromagnético, e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação quer seja na forma de imagem, na forma gráfica ou de tabelas, conforme é mostrado na Figura 6.2.



IMAGEM



GRÁFICO

TABELA

N	Nível de cinza
1	47
2	50
3	52
4	45

Fig.6.2 – Produtos gerados a partir de dados coletados pelos sistemas sensores.

Um sistema sensor é constituído basicamente por um coletor, que pode ser um conjunto de lentes, espelhos ou antenas, e um sistema de registro (detetor) que pode ser um filme ou outros dispositivos e um processador, conforme é ilustrado na Figura 6.3.

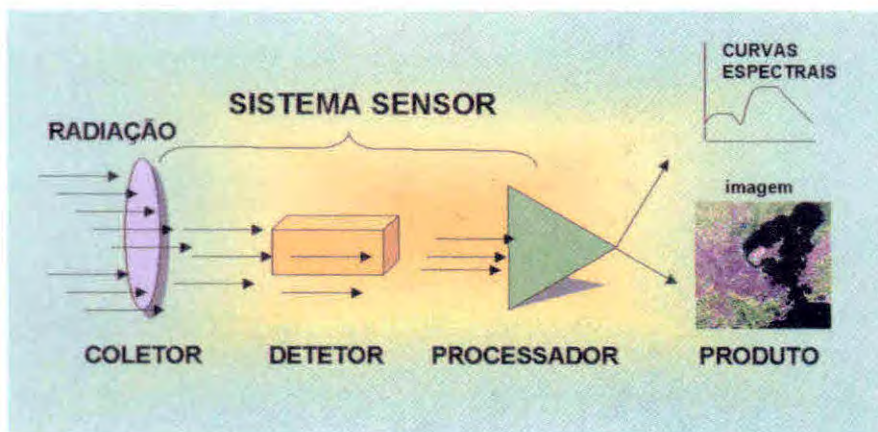


Fig. 6.3 – Partes componentes de um sistema sensor.

As quantidades relacionadas com a energia radiante que podem ser medidas com os sensores não-fotográficos são denominadas grandezas radiométricas.

Para melhor entender os sistemas sensores e as quantidades da energia radiante que podem ser medidas por eles, é preciso introduzir, a partir de agora, alguns conceitos sobre **grandezas radiométricas**. De acordo com Steffen et al. (1996), no Sistema Internacional de Unidades as principais grandezas radiométricas são:

Energia radiante (Q) – é a grandeza radiométrica fundamental que indica a quantidade de energia associada a um fluxo de radiação e sua unidade é o Joule (J).

Fluxo radiante (ϕ) – É a quantidade de energia radiante que flui por uma posição do espaço na unidade de tempo (taxa de transferência), definido por:

$$\phi = \Delta Q / \Delta t \quad (6.1)$$

onde, ϕ é o fluxo medido em Joule/segundo (J/s) ou Watt (W), ΔQ é a quantidade de energia radiante em J e Δt o intervalo de tempo em segundo.

Irradiância (E) – Quando o fluxo radiante irradia (ilumina) uma área da superfície terrestre (amostra de superfície), a razão entre o fluxo e a área da amostra é a sua irradiância (Figura 6.4A):

$$E = \Delta \phi / \Delta a \quad (6.2)$$

Onde E é a irradiância em W/m^2 , $\Delta \phi$ o fluxo em W e Δa é a área da amostra em m^2 .

Por outro lado, se um fluxo de radiação colimado (unidirecional) incide perpendicularmente sobre uma área de superfície plana, a sua interseção com o plano da superfície determina a área irradiada. Porém, se a direção do fluxo for inclinada, como na Figura 6.4B, a área da interseção aumenta enquanto o fluxo permanece constante. Neste caso, a irradiância diminui de valor pois o fluxo se distribui por uma área maior. Para calcular a irradiância, nesta situação, deve-se considerar o ângulo de inclinação do fluxo. A lei que estabelece o valor da irradiância para fluxos inclinados é denominada **Lei do Co-seno da Irradiância** e é descrita pela equação 6.3,

$$E_{\theta} = E_0 \cdot \cos \theta \quad (6.3)$$

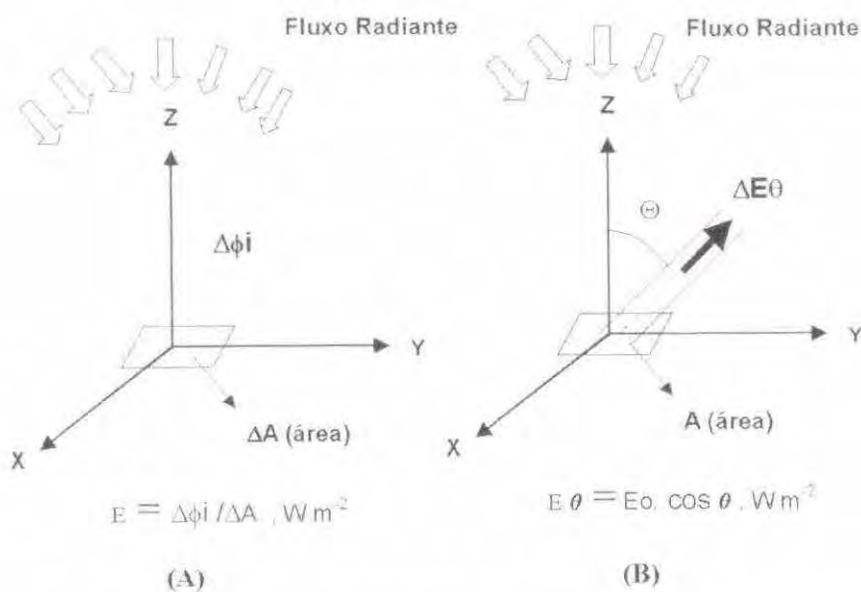


Fig.6.4 – Esquema para ilustrar a irradiância – E (A) e a lei do co-seno da irradiância (B). FONTE: adaptada de Steffen et al. (1996)

Intensidade radiante (I) – é a densidade espacial do fluxo que tem origem numa fonte puntiforme como é mostrado na Figura 6.5. A intensidade radiante numa determinada direção é definida pela razão entre o fluxo que se propaga num ângulo sólido amostral (ângulo qualquer) com origem na fonte e a dimensão desse ângulo sólido, cuja unidade é Watt/esterradiano (W/sr):

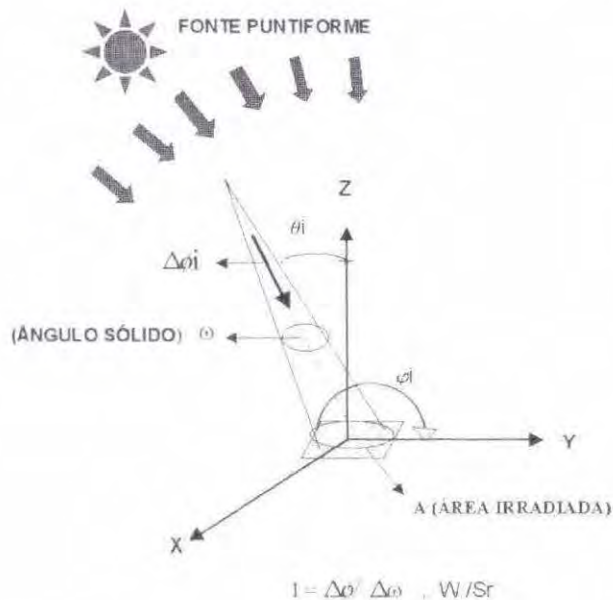


Fig 6.5 - Esquema para ilustrar a intensidade radiante (I) sobre uma área irradiada por uma fonte puntiforme. FONTE: adaptada de Steffen et al. (1996).

Do ponto de vista prático, uma fonte puntiforme é aquela cujas dimensões podem ser consideradas desprezíveis, quando comparada com a distância em que é observada (p.ex.: uma estrela, o sol ou uma lâmpada distante). A intensidade radiante mede o “brilho” da fonte em cada direção do espaço.

Radiância (L) – Se as dimensões de uma amostra de superfície podem ser consideradas desprezíveis, com relação à distância em que são observadas, o “brilho” dessa amostra, em cada direção (Figura 6.6A) é medido pela sua radiância definida por:

$$L = \Delta\phi / \Delta\omega \cdot \Delta a \cos\theta \quad (6.4)$$

onde, Δa é amostra de superfície (área do terreno); θ é o ângulo entre a direção da radiação e a normal.

Quando a radiância de uma amostra de superfície é constante, em qualquer direção que seja observada, a superfície é denominada lambertiana ou difusor perfeito.

Exitância (M): enquanto a irradiância expressa a quantidade do fluxo que irradia a amostra de superfície, exitância expressa a quantidade de fluxo que sai da amostra de superfície que é definido pela razão entre o fluxo que deixa a amostra (reflexão ou emissão) e a área da amostra (Figura 6.6B) expressa por:

$$M = \Delta\phi_r / \Delta a \quad \text{ou} \quad M = \Delta\phi_e / \Delta a \quad (6.5)$$

onde, o subscrito e é a quantidade de fluxo emitido da amostra de superfície.

Tanto a irradiância quanto a exitância envolvem a medição de toda radiação que chega ou que deixa a amostra de superfície.

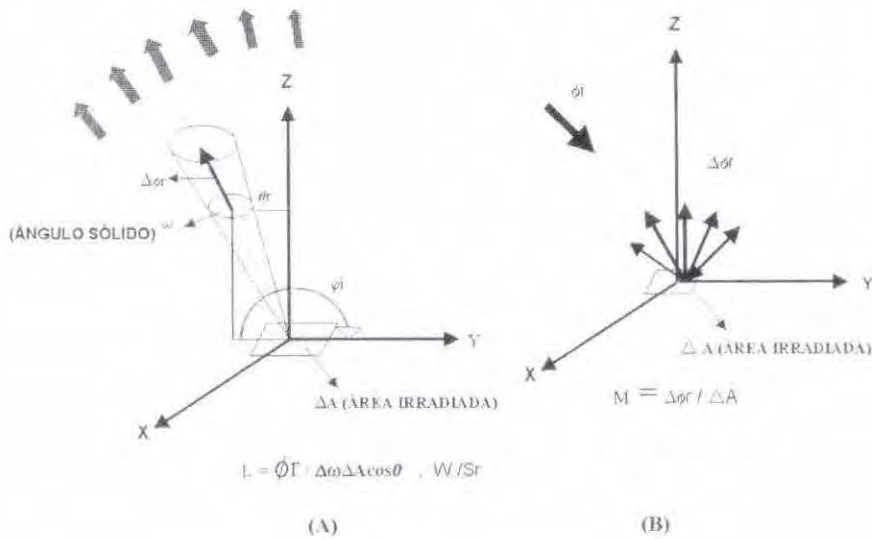


Fig. 6.6 – Esquema para ilustrar a radiância (L) e a excitação (M) provenientes de uma área irradiada. FONTE: adaptada de Steffen et al. (1996).

6.2 Classificação dos Sistemas Sensores

Os sistemas sensores podem ser classificados quanto: à *fonte de radiação*, ao *princípio de funcionamento* e ao *tipo de produto*, conforme é resumido na Figura 6.7.



Fig.6.7 – Classificação dos sistemas sensores quanto à categoria, tipo de produto e fonte de radiação.

6.2.1. Quanto a Fonte de Radiação

Os sensores que medem a radiação refletida e/ou emitidas pelos alvos, que provém de uma fonte externa (e.x. do sol), são denominados de sensores **passivos**, porque eles não possuem radiação própria, isto é, dependem de uma fonte de iluminação externa, conforme é ilustrado na Figura 6.8A.

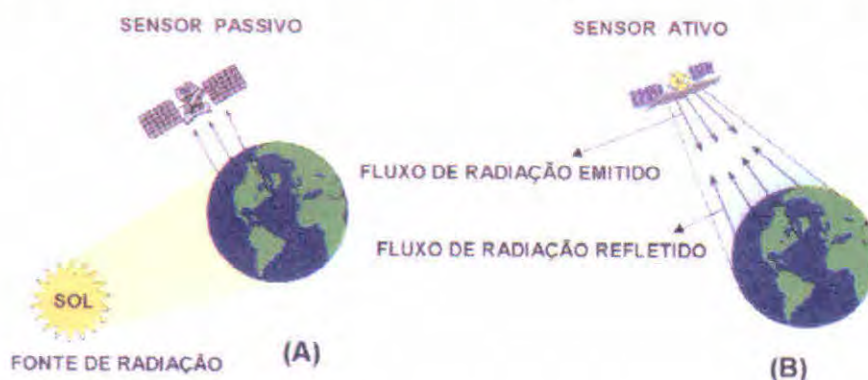


Fig 6.8 – Esquema para ilustrar um sensor passivo (A) e um sensor ativo (B).

Observe na Figura 6.8A que a radiação que incide nos alvos da superfície terrestre provém do sol (fonte externa). Essa radiação ao interagir com os alvos parte dela é refletida, indo atingir o detetor de um sistema sensor que, eventualmente, esteja sobre a área irradiada. Nesta categoria de sensores temos o SPECTRON-SE590, o Mapeador Temático (TM) do Landsat, o Haut Resolution Visible (HRV) do SPOT, etc.

Por outro lado, se o sistema sensor possui uma fonte de radiação, isto é, não depende de uma fonte externa para irradiar o alvo, ele é dito **ativo**. Neste caso, o sensor emite um fluxo de radiação em determinada faixa espectral que interage com os alvos na superfície da Terra e a parte que é refletida é, então, captada pelo sensor. Como exemplo de sistema ativos têm-se os radares, o laser, radiômetros de microondas e câmaras fotográficas quando utilizam como fonte de radiação o “flash” (Figura 6.8B).

6.2.2. Quanto ao Princípio de Funcionamento

Os sensores passivos e ativos são agrupados em duas categorias quanto ao princípio de funcionamento: de varredura (“scanning”) e de não-varredura (“non scanning”).

Os sistemas sensores de não-varredura registram a radiação refletida de uma área da superfície da Terra em sua totalidade num mesmo instante. Por essa razão, são também conhecidos por sensores de quadro (“framing systems”). Os dados de radiação coletados por esses sensores podem ser expressos em duas formas: imagem e não-imagem (gráfica ou numérico). Nessa categoria temos os sistemas fotográficos (forma imagem) e os radiômetros (não forma imagem).

Por outro lado, nos sistemas sensores de varredura (scanning systems), a imagem da cena é formada pela aquisição seqüencial de “imagens elementares do terreno” ou “elemento de resolução”, também chamado de “pixel”(Novo, 1992). Conforme exemplificado na Fig 6.7, temos os sensores eletro-óptico-mecânicos, as câmeras CCD, os radares, entre outros.

Na literatura podem ser encontradas outras maneiras de classificar os sistemas sensores. Entretanto, todas elas têm como base a fonte de radiação e o produto gerado. Por exemplo, Novo (1992) adota a classificação dos sistemas sensores em duas categorias: imageadores e não-imageadores, levando-se em conta a fonte de radiação (passivos e ativos). Na categoria dos sistemas não-imageadores incluem-se os radiômetros e, na categoria de imageadores os sistemas fotográficos, sensores de varredura eletro-óptico-mecânicos, os radares de visada lateral, etc.

6.2.3. Quanto ao tipo de produto

Quanto ao tipo de produto obtido por um sistema sensor, encontra-se na literatura, uma visão bem simples, a classificação dos sistemas sensores dada em função dos sistemas fotográficos. Em outras palavras, dividem-se os sistemas sensores em duas categorias: sistemas fotográficos e os não-fotográficos. Nesse caso, os sistemas fotográficos são caracterizados como num caso a parte dos demais sistemas sensores.

Nessa forma de classificar os sistemas sensores, definem-se os sistemas fotográficos como sendo todos dispositivos imageadores (produz imagem) que, através de um sistema óptico (conjunto de lentes), registram a energia refletida pelos alvos da superfície da Terra em uma película fotossensível, que são os filmes fotográficos (detetores). Os sistemas fotográficos podem ser Para os objetivos do sensoriamento remoto, os sistemas fotográficos mais utilizados são aqueles aerotransportados, entre eles podemos citar as câmeras métricas.

Sensores não-fotográficos são dispositivos utilizados para medir a intensidade da radiação eletromagnética, proveniente dos alvos de uma superfície da Terra, em determinadas faixas espectrais do espectro eletromagnético. Os equipamentos que dispõem de sistemas sensores não-fotográficos são chamados de radiômetros.

No nosso estudo sobre sistemas sensores o termo radiômetro foi várias vezes mencionado sem, no entanto, esclarecer o que é um radiômetro.

Os radiômetros são sistemas passivos que medem a intensidade da energia radiante (radiância), proveniente de todos os pontos de uma superfície, dentro do campo de visada (FOV), em determinadas regiões espectrais do espectro eletromagnético. Essas regiões, geralmente, são selecionadas através de um filtro que bloqueia o restante da radiação que incide no sistema. Os radiômetros podem ser classificados como não-imageadores e imageadores.

- *Radiômetros não-imageadores*

Os radiômetros não-imageadores medem a radiância do alvo e apresentam os dados em forma de gráfico ou numéricos.

Quando um radiômetro expressa os dados na forma numérica, ele é dito radiômetro de banda. Nesse caso, o equipamento registra a radiação que provem dos alvos em faixas largas do espectro eletromagnético. Como exemplo, poderíamos citar o Exotech, que opera em 4 faixas espectrais (0,5 mm – 0,6 mm; 0,6 mm – 0,7 mm; 0,7 mm – 0,8 mm; 0,8 – 1,1 mm). O valor da radiância gerado em cada uma dessas faixas ou bandas espectrais, corresponde a um valor médio da radiância em cada comprimento de onda contido nessas faixas ou bandas espectrais. É bom salientar que existem radiômetros de bandas que operam somente numa dada faixa espectral, como é o caso do “thermopoint” (opera de 8 mm a 14 mm), utilizado para medir temperatura de alvos ou sensor quântico de linha (LAI – 2000) que opera na banda espectral de 400 nm a 700 nm, empregado para medir a radiação fotossinteticamente ativa. A maioria desses sensores opera nas regiões espectrais do infravermelho termal (8,0 μm a 14,0 μm) e microondas (0,3 mm a 30 mm).

Os radiômetros, cujos dados permitem obter uma dos valores da radiância, numa determinada faixa do espectro eletromagnético, recebem a denominação de espectrorradiômetros. A diferença desse tipo de equipamento, em relação aos radiômetros não-imageadores, reside no fato de que estes operam em faixas espectrais estreitas ao longo da faixa de atuação. Em outras palavras, o sistema possui dispositivo capaz de registrar valores da radiância incidente em pequenas faixas espectrais, dentro do intervalo de comprimento de onda que opera o sistema. Como exemplo de um espectrorradiômetro temos O SPECTRON – SE590 que fornece 255 valores da radiância proveniente do alvo, na faixa espectral entre 400 nm a 1100 nm.

- Radiômetros imageadores

Os radiômetros imageadores são equipamentos cujos resultados finais são em forma de imagens de uma área (cena) no terreno. Nestes equipamentos, o elemento de resolução do terreno (ERT) se desloca gerando uma linha de varredura. Sob a designação de imageadores (“scanners”) há uma grande variedade de sistemas sensores não-fotográficos, que registram a radiação eletromagnética em diferentes faixas do espectro eletromagnético, desde o ultravioleta até o infravermelho distante (aproximadamente de 0,2 μm até 14 μm).

As características dos sistemas sensores não-fotográficos imageadores em geral são expressas em função de quatro domínios de resolução, a saber: *espectral, espacial ou geométrica, temporal e radiométrica*, sobre as quais discutiremos a seguir:

Resolução espectral: refere-se ao poder de resolução que o sensor tem para discriminar diferentes alvos sobre a superfície terrestre. Em outras palavras, refere-se à melhor ou à pior caracterização dos alvos em função da largura da banda espectral em que o sensor opera. Por exemplo, suponha que um sensor **A** opere na faixa espectral de 500 nm a 700 nm, e um sensor **B** na faixa espectral de 500 nm a 550 nm. Nesta situação, o sensor **A** apresenta menor resolução espectral do que o sensor **B**, uma vez que a largura de faixa (banda espectral) de cada um deles corresponde a 200 e 50 nm respectivamente. Quanto mais fina for a largura de faixa que opera um determinado sensor, melhor é sua resolução espectral. Por outro lado, se um sistema sensor possui detetores operando em mais de uma faixa espectral, do espectro eletromagnético, o sistema é dito multiespectral, porque registra a radiação eletromagnética proveniente dos alvos em várias faixas espectrais, como exemplo, os sistemas sensores a bordo dos satélites Landsat dos quais falaremos mais adiante.

Às vezes, no próprio sistema sensor há diferentes resoluções espectrais. Para entender a resolução espectral, citemos um exemplo concreto. O sensor MSS do Landsat opera em quatro bandas espectrais, ou seja, MSS4 (500 – 600 nm), MSS5 (600 – 700 nm), MSS6 (700 – 800 nm) e MSS7 (800 – 1100 nm). A resolução espectral das bandas MSS4, 5 e 6 é de 100 nm, enquanto que da banda MSS7 é de 300 nm. É fácil perceber isto, uma vez que, a largura de faixa para os três primeiros sensores é de 100 nm, enquanto que para o MSS7 a largura de faixa é de 300 nm. Assim, a resolução espectral do sistema MSS depende da banda ou de tipo de sensor.

O termo resolução espectral é, muitas vezes, utilizado erroneamente. É comum ouvir das pessoas, menos avisadas, que um sensor que opera em menos bandas espectrais do que outro, tem menor resolução espectral. Por exemplo, se um sensor **X** opera em 4 bandas espectrais e outro sensor **Y** em 6 bandas espectrais, dizem que o sensor **Y** tem melhor resolução espectral do que o sensor **X**. Na verdade, o sensor **Y** pode não apresentar melhor resolução espectral, do que o sensor **X**, apenas opera em maior número de bandas espectrais. Por operar em maior número de bandas espectrais, pode ser que alguma dessas bandas que não existem no sensor **X** é capaz de individualizar dois objetos sobre a superfície imageada que não foi possível ser distinguidos nos dados do sensor **X**. Entretanto, vale lembrar que isso não significa resolução espectral.

Resolução espacial ou geométrica: refere-se ao campo de visada instantânea (IFOV, do inglês, Instantaneous Field of View). No solo, a resolução espacial pode ser definida como sendo a menor área do terreno que um sistema sensor é capaz de individualizar. O valor radiométrico do IFOV é a média dos valores das radiâncias dos diferentes objetos que ocorrem dentro da área no terreno, que depende da resolução de cada sensor. Para ilustrar o que foi dito acima, na Figura 6.9 é mostrado um esquema de uma área no terreno, com diferentes ocupações do solo, correspondente a um IFOV e, na Figura 6.10, são mostrados imagens de diferentes sistemas sensores com diferentes resoluções espaciais.

Observe que existem na área do terreno, dentro do IFOV, cinco tipos de alvos: mata, cana-de-açúcar, solo desnudo, água e pastagem. Cada um destes alvos reflete e/ou emite a radiação

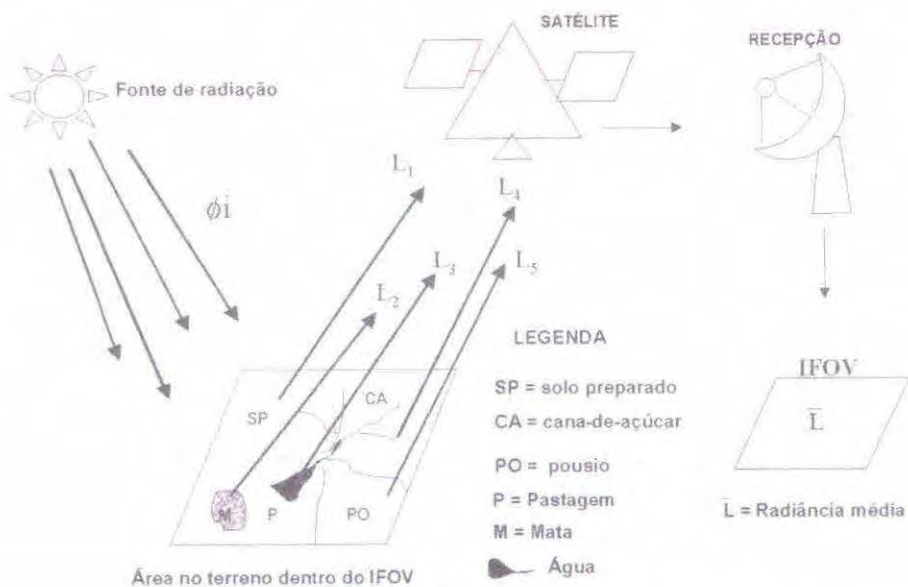


Fig.6.9 – Esquema para mostrar o elemento de resolução de um sistema sensor.

Área de São José dos Campos – escala 1:30.000

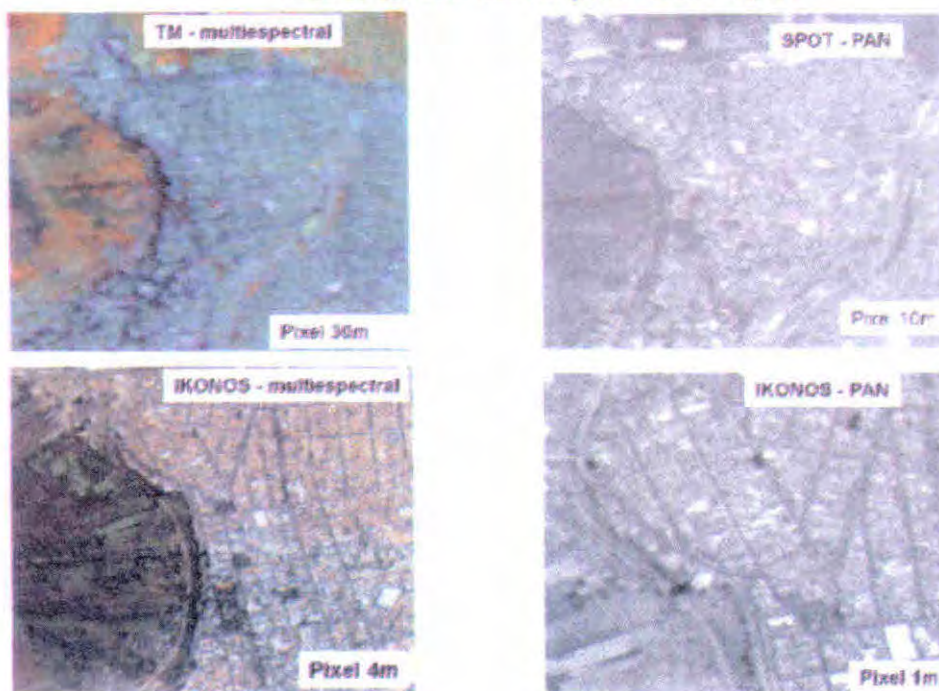


Fig.6.10 – Imagens do Landsat/TM, do SPOT/PAN, do IKONOS com resoluções espaciais de 30, 10, 1 e 4 m, para uma escala de 1:25 000.

eletromagnética (radiância) com intensidade diferente uns dos outros (simbolizados com cores diferentes). Após a radiação composta incidir nos detetores, há uma integração das diferentes radiações provenientes dos alvos, resultando numa média dessas radiações e é registrado um único sinal, que representa a radiância média do IFOV.

Para sistemas imageadores aerotransportados o IFOV, normalmente, varia de 1 a 2,5 miliradiano (mrad), isto é, de uma altura de 1.000 metros a resolução no solo é de 1 a 2,5 m (Chipman, 1990), enquanto que para os sensores MSS do Landsat a resolução é cerca de 0,083 miliradiano, o que equivale a uma resolução no terreno de aproximadamente 79 m x 79 m ou a uma área de 6.241 m². Já o sensor TM tem uma resolução espacial de 0,032 mrad o que resulta numa resolução no solo de 30 m

x 30 m (área de 900 m²). Isto, sob o ponto de vista de mapeamento de áreas agrícolas por exemplo, significa que o cálculo de área segue à seguinte ordem de precisão: sensores aerotransportados > sensor TM > sensor MSS.

No caso dos sensores fotográficos, a resolução espacial depende das características físicas do filme utilizado, da distância focal e da distância do objeto a ser fotografado. Por exemplo, um bom filme fotográfico pode discriminar 80 a 100 linhas por milímetro; se a foto for tomada numa escala de 1:10.000 e o formato da foto for de 23 cm x 23 cm, a resolução do sistema fotográfico pode variar de 12,5 a 10 cm sobre o solo, ou seja, o sistema é capaz de separar objetos com tamanhos entre 12,5 a 10 cm.

Resolução temporal: esta resolução é função das características da plataforma na qual o sensor está colocado. No caso de sistemas sensores orbitais, a resolução temporal indica o intervalo de tempo que o satélite leva para voltar a recobrir a área de interesse. Isso depende da largura da faixa imageada no solo. Por exemplo, o sensor TM do Landsat-5 tem uma resolução temporal de 16 dias, isto é, a cada 16 dias o Landsat-5 passa sobre um mesmo ponto geográfico da Terra. Assim, nós dizemos que a resolução temporal do sensor TM é de 16 dias. Já os sistemas sensores a bordo do satélite NOAA têm uma resolução temporal de 9 dias, no entanto, como a largura de faixa é muito grande, é possível obter dados diários sobre um mesmo ponto.

A resolução temporal é muito importante porque permite fazer um acompanhamento dinâmico dos alvos sobre a superfície da Terra.

Resolução Radiométrica: a radiação eletromagnética, refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre, possui valor de intensidade que difere de um alvo para outro. Por exemplo, para certos comprimentos de onda, uma vegetação reflete e/ou emite muito menos energia do que uma placa de zinco. Entretanto, certos alvos, apesar de serem diferentes, refletem ou emitem a radiação eletromagnética com valores de intensidade muito próximos entre si, tornando-se quase idênticos espectralmente. Assim, a resolução radiométrica de um sensor refere-se à capacidade que este sensor tem de poder discriminar, numa área imageada, alvos com pequenas diferenças de radiação refletida e/ou emitida.

Por outro lado, a radiação ao incidir no detetor é transformada em sinal elétrico, ampliada e retransmitida para um sistema de recepção ou gravada em dispositivos (gravadores), contidos na plataforma. Desta forma, pode-se dizer que a resolução radiométrica está associada a capacidade do sistema sensor em discriminar sinais elétricos com pequenas diferenças de intensidade.

Para representar esses valores da intensidade do sinal elétrico, que são enviados ou gravados a bordo, atribui-se tons de cinza, que variam de escuro, para o valor de intensidade igual ou próximo de zero, e cinza claro para o maior valor de máxima intensidade. Entre estes dois extremos, associam-se tons de cinza que variam do escuro ao claro, sendo, geralmente, denominados por cinza-claro, cinza-médio, cinza médio-escuro, etc.

A quantidade de níveis de cinza que um dado produto de satélite pode apresentar depende do sistema de gravação do sensor. Por exemplo, se os sinais são gravados em 2 bits, a resolução radiométrica será de 4 níveis digitais ou níveis de cinza. Isso quer dizer que, se numa dada área imageada por este sensor, tiver 50 alvos com reflectâncias diferentes, essas reflectâncias serão representadas por apenas 4 níveis de cinza. Dá para perceber que muitos desses alvos serão agrupados numa única classe, ou seja, haverá um agrupamento de alvos cujos valores de reflectâncias serão próximos entre si, devido à pequena variação de nível de cinza. Para calcular a resolução radiométrica emprega-se a expressão 2^n , sendo "n" o número de bits utilizados na gravação. O exemplo a seguir ilustra bem o que foi discutido acima. Imagine dois sensores A e B. O sensor A grava os sinais elétricos em 4 bits e o sensor B, em 5 bits. Para saber a resolução radiométrica de cada um emprega-se a expressão 2^n . Assim, o sensor A tem uma resolução radiométrica de 16 níveis digitais ($2^4 = 16$), enquanto que a do sensor B será de 32 ($2^5 = 32$). Isto quer dizer que o sensor A só é capaz de separar em 16 níveis toda gama de

valores de intensidade da radiação refletida e/ou emitida pelos alvos da área imageada. Já o sensor B consegue individualizar 32 níveis. Logo, a resolução radiométrica do sensor B é melhor do que a do sensor A. Na Figura 6.11 pode-se ver duas imagens de Brasília com dois e quatro níveis de cinza.

Área Urbana de Brasília - DF

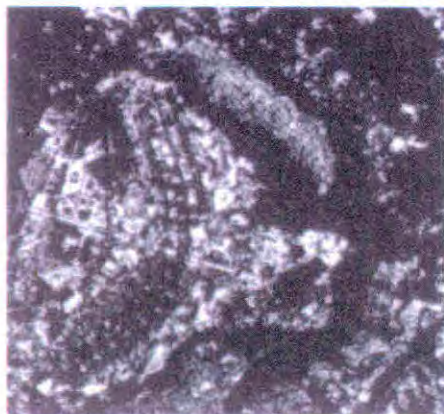


Imagem e 2 níveis de cinza



Imagem em 4 níveis de cinza

Fig.6.11 – Simulação de uma imagem do Landsat-TM com dois e quatro níveis de cinza-obtida sobre a cidade de Brasília.

Em alguns sistemas imageadores o sinal proveniente de um detector modula a cintilação de uma lâmpada, cuja luz impressiona um filme fotográfico, segundo linhas perpendiculares ao comprimento do mesmo. Desta forma, obtém-se uma imagem muito parecida a uma fotografia convencional. Entretanto, na maioria dos sistemas imageadores, o sinal proveniente dos detectores é gravado em fitas magnéticas, ou no caso de satélites não tripulados, é transmitido para estações terrenas, como exemplo, a estação de recepção de dados de satélites, localizada em Cuiabá – MT.

No caso dos sensores ativos, eles possuem suas próprias fontes de radiação, ou seja, emitem um fluxo de radiação em determinada faixa espectral, o qual interage com os alvos na superfície da Terra. A parte que é refletida é, então, captada pelo sensor. Como exemplos de sensores ativos têm-se os sistemas de radares, laser e câmeras fotográficas quando utilizam, como fonte de radiação, o “flash”.

6.3 Níveis de Coleta de Dados Especiais

O procedimento de aquisição das medidas das propriedades espectrais dos alvos da superfície terrestre, através dos sistemas sensores, pode ser feito em três níveis: **terrestre, suborbital e orbital**.

No nível terrestre, os sistemas sensores podem, ainda, ser instalados em mastros, colocados em barcos, fixados em bóias ou fixados dentro de laboratórios. No nível suborbital, geralmente, utiliza-se como plataforma de coleta de dados aeronaves, e para o nível orbital, empregam-se os satélites não tripulados e balões, como pode ser visto na Figura 6.12. Há também sistemas sensores que são utilizados em plataformas orbitais tripuladas, porém de uso mais específico para pesquisa.

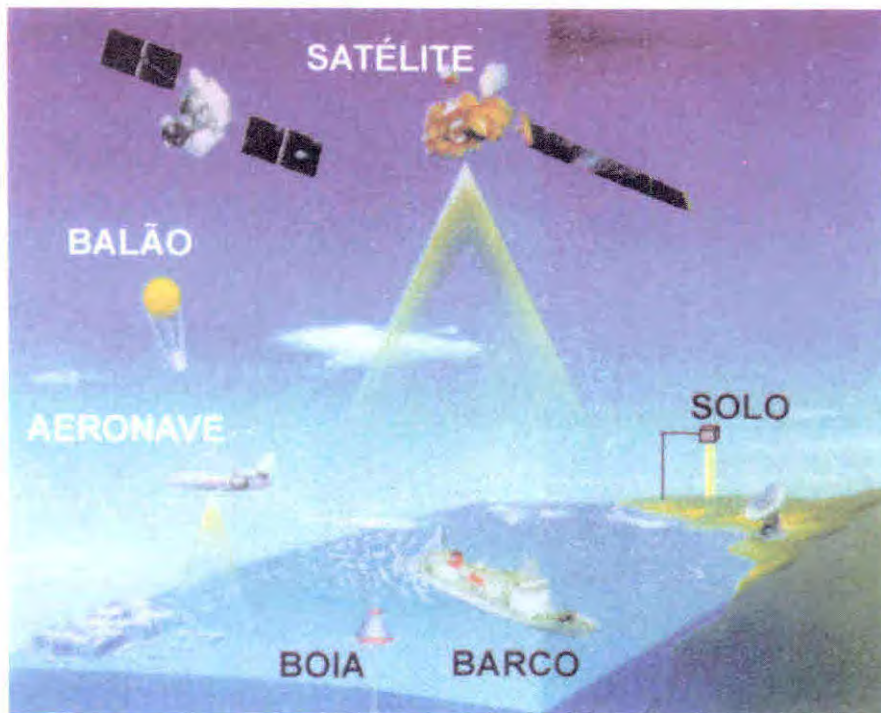


Fig. 6.12 – Níveis de coleta da energia refletida e/ou emitida pelos alvos na superfície da Terra.

A utilização de um dado sensor ou de outro, num determinado nível de coleta de informações espectrais, depende, sobretudo, de fatores relacionados com: a) objetivo da pesquisa; b) tamanho da área imageada; c) disponibilidade de equipamentos sensores e d) custo e precisão desejada dos resultados obtidos. Entretanto, alguns sistemas sensores são mais exaustivamente utilizados em determinados níveis de coleta de dados do que outros. Por exemplo, os radiômetros portáteis e os espectrorradiômetros são equipamentos muito utilizados para obter informações espectrais em áreas experimentais. Os sensores fotográficos (Câmeras fotogramétricas) e, mais recentemente, os radiômetros hiperespectrais são aerotransportados porque são equipamentos com configuração para operar neste tipo de plataforma, ou seja, em nível aéreo. Os “scanners” (imageadores) são muito utilizados em satélites não tripulados como no Landsat, no SPOT, entre outros.

Capítulo 7

Sistemas sensores utilizados para coleta de dados espectrais em nível terrestre

O uso de sistema sensores em nível de solo para obter dados da radiação refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre é, sem dúvida, muito importante para entender o comportamento espectral de alvos. Por exemplo, a radiometria de campo é muito usada nos estudos que relacionam comportamento espectral com anomalias na planta, provocadas por estresse, como deficiência de nutrientes. A radiometria de campo é também muito utilizada em pesquisa sobre estimativas de parâmetros biofísicos usados em modelos de crescimento de cultura, como é o caso do índice de área foliar.

O fato das medidas serem feitas a curta distância e em pequenas áreas amostrais permite que os resultados obtidos retratem, com maior fidelidade, aquilo que se deseja investigar.

Os sistemas sensores utilizados para medir a radiação refletida ou emitida pelos alvos, tanto no campo como em laboratório, normalmente são categorizados em função da região espectral em que operam. Epiphany (1989) comenta que essa categorização é necessário, porque cada sensor tem características ópticas e de detecção própria. Por exemplo, os detectores de silício (Si) são sensíveis à radiação eletromagnética nas faixas espectrais do visível e do infravermelho próximo. Os detectores compostos índio e estanho (InSb) são sensíveis apenas à radiação eletromagnética do infravermelho médio. Já aqueles cuja composição contém a combinação dos elementos químicos mercúrio, cádmio e telúrio (HgCdTe) são utilizados para medir a radiação na região do termal. Para a região das microondas, há dois tipos básicos de instrumentos: os radares (ativos) e os radiômetros de microondas (passivos).

7.1 Sensores que Operam na Região do Visível e do Infravermelho Próximo

Nesta faixa do espectro, os sensores registram a radiação eletromagnética no intervalo de comprimento de onda de 400 nm a 1100 nm, podendo chegar até 2500 nm, através da combinação de detectores diferentes num mesmo equipamento. Nesta categoria de sensores têm-se os radiômetros de banda e os radiômetros de varredura contínua.

Os radiômetros de banda operam em faixas largas e discretas do espectro eletromagnético. Para entender melhor o conceito de radiômetro de banda, imagine um sistema sensor que opere no intervalo espectral de 400 a 800 nm (range de variação). Se colocarmos neste equipamento, dispositivos que seleciona a radiação eletromagnética em faixas discretas, digamos de 100 nm, esse equipamento

registra a radiação refletida pelos alvos da superfície terrestre, em quatro faixas espectrais (400 - 500 nm, 500 - 600 nm, 600 - 700 nm, 700 - 800 nm). Assim, o equipamento fornece quatro valores da radiação refletida no intervalo de comprimento de onda de 400 a 800 nm. Como exemplo de radiômetro de banda temos o Exotech, que opera em quatro bandas espectrais largas entre 400 e 1100 nm. Em nível orbital, temos os sensores da maioria dos satélites de recursos naturais, HRV do SPOT, o MSS do Landsat, CCD do CBERS, etc.

Por outro lado, os radiômetros de varredura contínua distinguem-se dos radiômetros de banda, porque operam em faixas espectrais estreitas. Esses equipamentos possuem sistema de dispersão para decompor a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda, de maneira que possa registrar a radiação refletida em várias faixas espectrais muito estreitas. Nesta categoria temos o espectrorradiômetro que opera na faixa espectral de 350 a 1100 nm, registrando a radiação refletida pelos alvos em 256 valores radiométricos. Assim, é possível traçar a curva espectral do alvo dentro deste intervalo de comprimento de onda do espectro eletromagnético.

Pelo fato desses os sensores operarem na faixa reflectiva do espectro eletromagnético, os dados obtidos referem à radiação refletida pelos alvos. Logo, a compreensão do conceito de reflectância é fundamental.

O uso do termo reflectância, normalmente, é empregado de forma ambígua, para referir duas medidas diferentes da energia refletida, obtida por técnicas radiométricas, ou seja, a reflectância propriamente dita e o fator de reflectância (Epiphaniô, 1989).

A reflectância, representada pela letra grega "ρ", é um número adimensional, que expressa a razão entre o fluxo refletido e o incidente, sobre uma área de interesse. Neste caso, deve-se levar em conta o posicionamento do alvo, do sensor e da fonte de iluminação, conforme é mostrado na Figura 7.1.

$$\rho(\lambda) = \phi_r(\lambda) / \phi_i(\lambda) \quad (7.1)$$

onde: ρ é a reflectância, φ_r é o fluxo refletido, φ_i é o fluxo incidente; λ é o comprimento de onda.

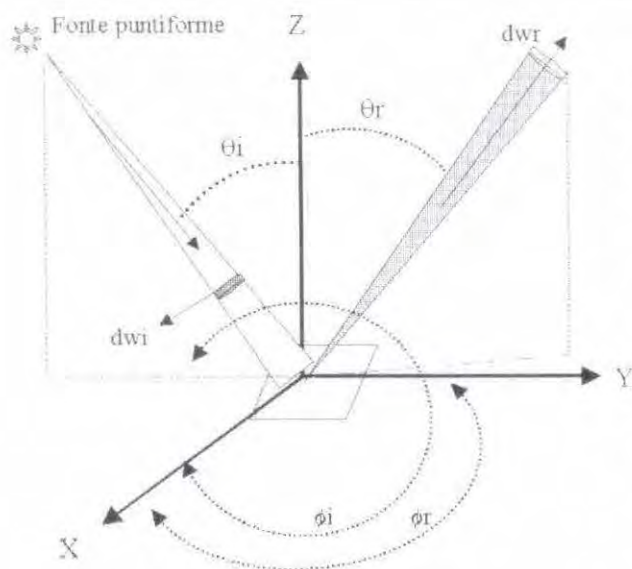


Fig. 7.1 – Geometria do fluxo incidente e do refletido pelo alvo. Onde, i e r são os fluxos incidentes e refletidos, dA_i e dA_r são os ângulos sólidos, dA é a unidade de área imageada, θ é o ângulo azimutal e ϕ é o ângulo zenital em relação ao eixo Z, perpendicular à área dA . FONTE: adaptada de Nicodemus et al. (1977).

Por outro lado, o fator de reflectância é definido como a razão entre o fluxo refletido por uma superfície amostral qualquer (por exemplo, um dossel de trigo) e o fluxo refletido, na mesma geometria, por uma superfície padrão perfeitamente difusora, irradiada da mesma maneira que a da superfície amostral. A superfície padrão, mais comumente utilizada é a placa de Sulfato de Bário ($BaSO_4$) ou de Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$). Essa placa padrão é, as vezes, denominada placa de referência ou superfície de referência. O fator de reflectância é obtido pela razão entre esses dois fluxos. Isto é, o fluxo refletido pela amostra de área e o fluxo refletido pela placa padrão.

Na Figura 7.2 é mostrado um dos esquemas utilizados para medir o fator de reflectância da energia refletida por uma planta.

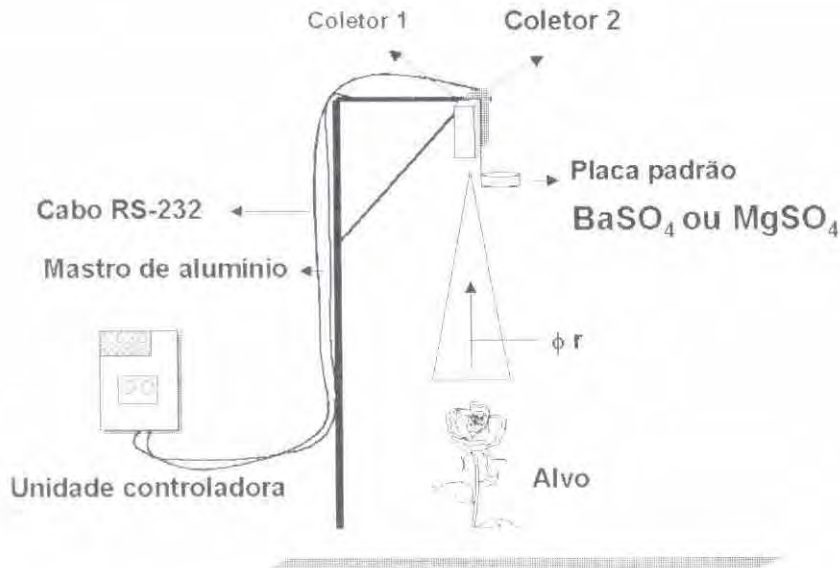


Fig. 7.2 – Esquema para mostrar uma das maneiras de obter o fator de reflectância

Para obter o fator de reflectância, conforme é mostrado na Figura 7.2, dois sensores (coletores) são colocados na extremidade superior do mastro, onde um deles mede o fluxo refletido pela planta e o outro, o fluxo refletido pela placa de referência (padrão). O fator de reflectância é obtido pela seguinte equação:

$$FR (\%) = \frac{\text{medida tomada sobre o alvo}}{\text{medida da placa de referência}} \times 100 \quad (7.2)$$

Na definição de um sistema sensor, para medidas espectrorradiométricas no campo, deve considerar, prioritariamente, as características dos espectros que se pretende obter, principalmente a resolução, a banda espectral, as dimensões da área amostral e a acessibilidade das áreas de interesse. Para o trabalho de campo é desejável a utilização de equipamentos radiométricos com as seguintes características:

- Peso e volume reduzidos.
- Suprimento de energia própria (bateria recarregável).
- Sistema digital para armazenamento de dados.
- Transferência dos dados para computador.

7.2 Sensores que Operam na Região do Infravermelho Terminal

Na termodinâmica encontra-se um postulado que diz “todo corpo com temperatura acima de zero grau Kelvin (K), ou seja, - 273 °C, absorve e/ou emite energia eletromagnética”. Assim, a quantidade de energia absorvida e/ou emitida é função direta da temperatura do corpo.

De maneira geral, os corpos na superfície da Terra encontram-se à temperatura média de 300 K (aproximadamente 27 °C). Nesta temperatura, a emissão de temperatura pelos os corpos tem o pico máximo ao redor de 9,6 μm, que é justamente a região espectral situada dentro da janela atmosférica

do termal, que vai de 8 a 14 μm . Assim, utilizando-se equipamentos que operam nesta janela atmosférica, é possível medir a radiação emitida pelos alvos na superfície terrestre.

Por outro lado, essa radiação emitida é devido à temperatura do corpo. Logo, conhecendo a emissividade do corpo e a medida da energia emitida é possível avaliar a temperatura desse corpo. Para quantificar a radiação emitida pelos corpos na superfície terrestre empregam-se vários radiômetros infravermelhos.

Os radiômetros infravermelhos são construídos de tal modo, que a radiação captada pelo coletor é constantemente comparada àquela emitida por um corpo negro, com emissividade igual a unidade (1), a uma determinada temperatura. Os resultados são apresentados, normalmente, sob a forma de temperatura de brilho, que seria a temperatura do alvo investigado se ele fosse um corpo negro. Entretanto, como os corpos naturais apresentam emissividade menor que 1,0 e entre o radiômetro e o alvo existe a atmosfera, as temperaturas obtidas através deste procedimento são menores que as reais.

Os radiômetros infravermelhos têm precisão que varia entre 0,1 e 0,5 $^{\circ}\text{C}$. Todavia, uma variação de 1,3% na emissividade dos alvos ocasionará uma variação de temperatura da ordem de 1 $^{\circ}\text{C}$, tornando claro, que uma correta interpretação dos levantamentos radiométricos pressupõe um conhecimento da emissividade dos alvos ou de sua temperatura real no momento da medida, além de um conhecimento da influência da atmosfera.

7.3 Sensores que Operam na Região de Microondas (> 1 mm)

Os sensores de microondas medem a radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 0,3 a 30 cm, ou seja, a radiação emitida pelos alvos naturais devido à temperatura a que estão submetidos.

Nesta região do espectro eletromagnético, a radiação é relativamente imune ao espalhamento e absorção pelos componentes atmosféricos, inclusive partículas dispersas e nuvens. Esta propriedade é extremamente importante porque permite a operação destes sensores em áreas cobertas com nuvens. Outro fato significativo é que, nesta região espectral, os alvos naturais apresentam comportamentos espectrais bastante distintos daqueles nas regiões do visível e do infravermelho.

A maior parte da instrumentação disponível opera nas seguintes faixas de frequência: 1,4 ; 2,7; 5,0; 10,6; 13,9 e 31,4 GHz, o que corresponde aos seguintes comprimentos de onda: 0,32; 0,81; 2,2; 3,2; 6,0 e 21 cm.

7.4 Descrição de Alguns Tipos de Sistemas Sensores Utilizados no Nível Terrestre

Atualmente existem vários sistemas sensores que são empregados em nível de solo, para obter dados espectrais sobre alvos na superfície terrestre, que atende, parcialmente, os requisitos comentados acima (Steffen et al., 1996). A seguir, serão descritos alguns equipamentos que operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético e as principais aplicações, devido à importância que eles representam ao contexto do sensoriamento remoto no Brasil.

7.4.1 – Spectron SE-590

O SPECTRON SE-590 é um espectrorradiômetro portátil, óptico-eletrônico, com espectro contínuo, composto de um detetor e um ou dois coletores interligados por uma interface RS-232, conforme pode ser visto no esquema da Figura 7.3.



Fig. 7.3 – Configuração básica do SPECTRON SE-590.

A configuração do SPECTRON SE-590, segundo Steffen et al. (1996), baseia-se numa rede de dispersão e numa matriz linear de foto-diodo. Esse equipamento é capaz de adquirir 256 medidas espectrais em intervalos bastante estreitos ($\cong 2.8$ nm), na faixa espectral compreendida entre 350 e 1100 nm do espectro eletromagnético. Durante a medição os espectros obtidos têm seus valores digitalizados e armazenados em uma fita cassete num “datalogger” e, posteriormente, são transferidos para um computador, para que se possa traçar as curvas espectrais dos alvos imageados. Existe também a possibilidade de registrar os espectros diretamente num laptop acoplado na unidade controladora, sem ter que registra-la na fita cassete.

As principais características do sistema são:

- Campo de visada: 1, 6, 15 e 180 °.
- Resolução espectral: 10 nm.
- Faixa espectral de operação: 350 a 1100 nm.
- Tempo de aquisição: 1/60 até 64/60 s.
- Unidade controladora: microprocessador programável.
- Energia: bateria recarregável (12 VDC).
- Cabo RS – 232: variável

Nos estudos relacionados à vegetação, principalmente em áreas agrícolas, as medidas radiométricas tomadas com o SPECTRON SE-590 são obtidas utilizando a unidade coletora fixada em um suporte (mastro de alumínio), numa determinada altura acima do dossel. Este suporte pode ser de vários formatos e de diferentes alturas. Na Figura 7.4 pode ser visto um exemplo de uma campanha radiométrica sobre uma área experimental de trigo, onde se utilizou um mastro de alumínio de três metros de altura para afixar os coletores. Este mastro permite acoplar dois sensores que mede, quase simultânea, a reflectância do alvo e da placa de referência sem ter que girar o sensor ora para o alvo ora para a placa de referência.



Fig. 7.4 – Foto de uma secção de medida radiométrica em áreas de trigo

7.4.2 – Sensor Quântico LI – 190 SA

O LI-190SA é um sensor passivo, designado para medir a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) na região espectral entre 400 e 700 nm, em locais onde a radiação a ser medida não é espacialmente uniforme, como exemplo, dentro de dosséis agrícolas. O equipamento é muito utilizado em experimento de campo e em ambiente controlado, isto é, laboratório.

Basicamente, o sistema é composto de um sensor de linha, de um metro de comprimento, feito de silicón foto-diodo e a unidade controladora (datalogger). A interface de ligação entre o sensor e a unidade controladora é feita por um cabo RS-232, conforme é mostrado na Figura 7.5.

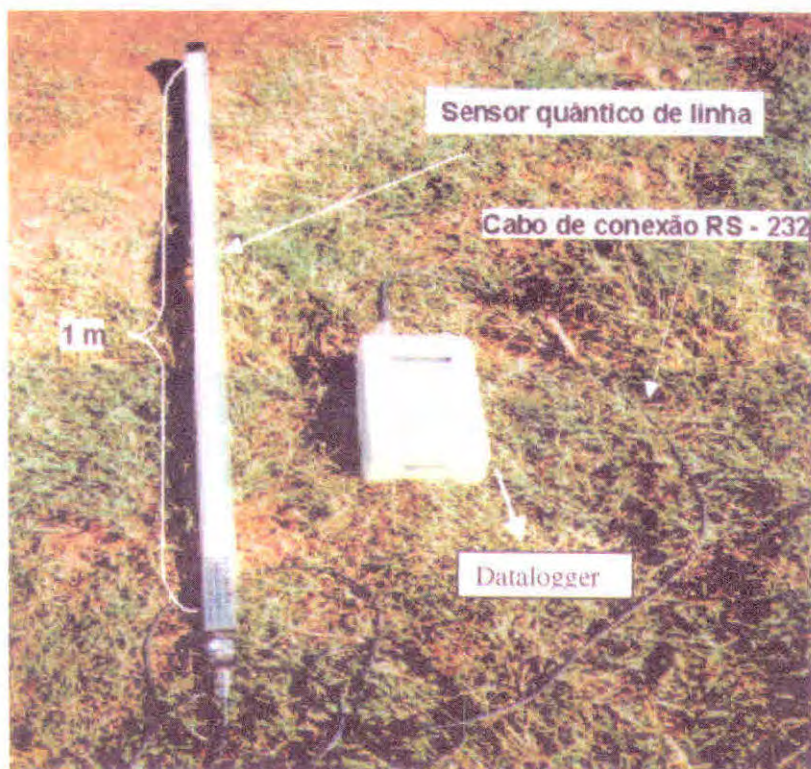


Fig. 7.5 – Foto para mostrar um sensor quântico LI – 190 SA, conectado ao datalogger através da interface RS -232.

É oportuno dizer que em muitos trabalhos, especialmente, àqueles da língua inglesa, a radiação fotossinteticamente ativa é referenciada como PAR (Photosynthetically Active Radiation). Neste capítulo adotou-se a sigla RFA, no lugar de PAR.

A partir da medida da RFA é possível quantificar a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI) pelo dossel da vegetação ou, então, a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA).

A radiação fotossinteticamente ativa interceptada RFAI é obtida através de duas medidas da radiação, ou seja, uma medida feita acima do dossel da vegetação e outra medida abaixo do dossel. Pela diferença entre as duas medidas obtém-se a RFAI.

Para obter a RFAA é necessário fazer quatro medidas da radiação (Hipps, 1983): duas medidas acima e duas medidas abaixo do dossel da cultura, assim definido:

(i) medidas acima do dossel:

a) densidade de fluxo incidente RFA (I_0);

b) densidade de fluxo refletido RFA, proveniente do dossel e do solo (I_r).

(ii) medidas abaixo do dossel:

a) densidade de fluxo transmitido através do dossel até a base da cultura (I_t);

b) densidade do fluxo refletido pelo solo (I_s).

A RFAA é determinada pela seguinte relação:

$$RFAA = \sum (I_0 + I_s) - (I_t + I_r), \quad \text{W m}^{-2} \quad (7.3)$$

Daughtry et al. (1992) mostraram que a diferença entre RFAI e RFAA, quando obtidas sobre as culturas de milho e soja, foi inferior a 3,5%. Porém, segundo ainda estes autores, quando estas diferenças são integradas ao tempo, podem levar a um valor considerável de erro. Por esta razão, deve-se ter muito cuidado em comparar resultados de RFAA e RFAI, quando relatados por diferentes pesquisadores.

O sensor LI-190 SA possui as seguintes características:

- Calibração absoluta: $\pm 10\%$
- Sensibilidade: $3 \mu\text{A}$ por $1000 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$
- Estabilidade: $< 2\%$ ao ano
- Tempo de resposta: $10 \mu\text{s}$
- Correção co-seno: difusor acrílico.
- Azimute: $< 1\%$ de erro acima 360° para uma elevação solar de 45° .
- Área sensoriada: 1 metro de comprimento por 12,7 mm de largura.
- Detetor: Silício fotovoltaico de alta estabilidade
- Tamanho: 116 cm de comprimento por 2,54 cm de largura por 2,54 cm de altura.
- Peso: 1,8 kg.
- Comprimento do cabo RS-232: 3,1 metros.

7.4.3 – Sensor LAI – 2000

O LAI-2000 é um sensor passivo, desenvolvido para estimar o índice de área foliar de dosséis de vegetação, sendo muito prático para uso em áreas agrícolas. Além disso, o LAI-2000 pode ser usado para medir produtividade de dossel, vigor de floresta, deposição de poluição do ar, estudos de ataque de insetos, etc. As medidas do IAF, feitas com o LAI-2000, são mais rápidas do que outros métodos indiretos (Lincon, 1992).

O equipamento mede a quantidade da luz difusa que atravessa o dossel da vegetação em diferentes

direções. Essa medida contém, essencialmente, dois tipos de informações estruturais do dossel: quantidade e orientação da folhagem.

O LAI-2000 é composto por duas unidades: uma contendo o coletor e o sensor, denominada de LAI-2050 e outra chamada de unidade controladora (datalogger), denominada de LAI-2070. A unidade controladora contém um microcomputador que registra os dados coletados no sensor. O sensor é ligado a unidade controladora através de uma interface (cabo RS-232), conforme é mostrado na Figura 7.6. Na Figura 7.7 é mostrado o sensor LAI 2050 e um esquema com os principais componentes, e na Figura 7.8 é pode ser visto um exemplo de uma tomada de medida na cultura do trigo, utilizando o LAI - 2000.



Fig.7.6 – Foto do LAI - 2000 e principais componentes. FONTE: Lincon (1992)

Fig. 7.7 – Foto do sensor LAI-2050 e um esquema para mostrar os principais componentes. FONTE: Lincon (1992).

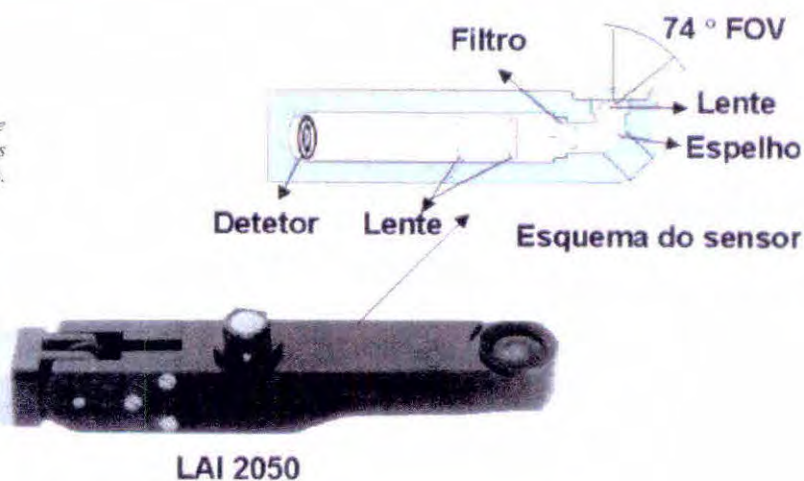




Fig. 7.8 – Medida do índice de área foliar (IAF) na cultura do trigo, através do LAI – 2000.

O LAI – 2000 mede a atenuação da radiação difusa para cinco ângulos zenitais diferentes simultaneamente. A parte óptica do sensor projeta a imagem de visada hemisférica para cinco detetores localizados numa das extremidades do sensor (Figura 7.7). Uma medida do IAF com o LAI – 2000, consiste de no mínimo 10 números: cinco números são sinais provenientes dos cinco detetores, quando o equipamento está acima do dossel da vegetação, e cinco quando está abaixo do dossel. A diferença observada entre as medidas acima e abaixo do dossel é utilizada para estimar o IAF. Portanto, os resultados obtidos são numéricos e podem ser armazenados na unidade controladora.

Principais características do LAI – 2000:

- Faixa de operação: 320 a 490 nm
- Memória RAM: 64 K bytes
- Interface de ligação sensor datalogger: RS – 232C.
- Energia: 6 pilhas “D”
- Duração das baterias : 260 horas
- Erro tolerável do sistema óptico: 1%
- Rejeição à radiação: 490 – 650 nm < 1% e > 650 nm < 0,1%
- Placas de direcionamento da luz: 0 ° , 45 ° , 90 ° , 180 ° e 270 ° .

O LAI 2000 fornece várias informações. Na Tabela 7.1 podem ser observado as principais informações que foram obtidas de uma medida numa área gramada, no dia 20 de julho de 1999, as 06:35:01h. Neste exemplo, a medida que deu origem a estas informações foi a de número cinco (FILE 5).

TABELA 7.1 – Principais resultados obtidos com o LAI - 2000

SIGLA	SIGNIFICADO
FILE = 5	X é o número de referência do arquivo
20 JUL 06:35:01	Data, hora de criação do arquivo
What = Grass	Tema (no caso grama)
Where = Lawn	Gramado
LAI = 2,59	Índice de área foliar
SEL = 0,13	Erro padrão do IAF
DIFN = 0,151	Fração visível da radiação difusa
MTA = 61	ângulo de inclinação médio solar
SEM = 5	erro padrão do MTA
SMP = 8	Número de pares de amostra usado no cálculo do IAF
$2*(S + 1) = 2,62$	Cálculo alternativo do IAF

Fonte: Lincon (1992)

7.4.4 – Sensor Thermopoint

O thermopoint é um equipamento portátil, desenvolvido com o objetivo de medir temperaturas de alvos à distância, isto é, sem contato direto. No princípio o instrumento foi desenvolvido com duas finalidades: a) medir temperaturas de equipamentos em funcionamento, como máquinas industriais, sem ter que removê-los durante o serviço e b) medir temperaturas de produtos manufaturados, no momento em que estão sendo produzidos (AGEMA, 1987). Entretanto, o equipamento apresenta requisitos básicos para medir temperaturas de dosséis de vegetação, sendo muito prático para uso em áreas agrícolas.

O princípio de funcionamento do thermopoint baseia-se num conjunto de lentes que coleta e focaliza a energia emitida pelo o alvo, num detetor infravermelho. O detetor responde e produz uma voltagem que é diretamente proporcional à quantidade de energia recebida e, conseqüentemente, com a temperatura do alvo (Figura 7.9).

As principais características do thermopoint são:

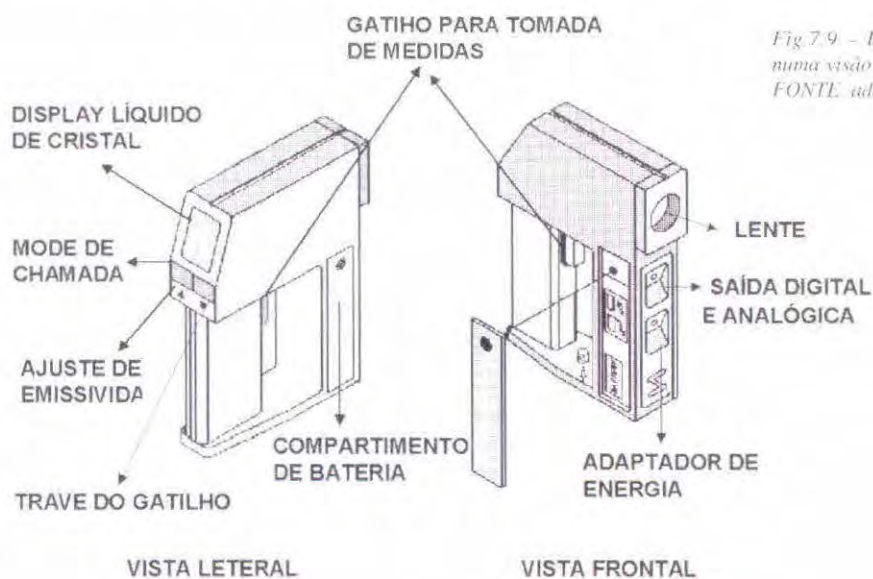


Fig. 7.9 – Esquema do thermopoint numa visão lateral e frontal
 FONTE: adaptada de AGEMA (1987).

- Exatidão: ± 1 dígito
- Resposta espectral: 8 a 14 μm
- Tempo de resposta: 250 msec.
- Temperatura do display: 1 ° F ou 0,03 °C
- Temperatura do ambiente para operação: 0 a 50 °C
- Energia: 9 VDC

7.4.5 – Sensor Ger Iris Mark-IV

O Ger Iris Mark-IV ou IRIS é um sensor, passivo, não imageador, que opera na região espectral do infravermelho distante. Por isso, é destinado a medir a radiação emitida (temperatura de brilho) pelos alvos dentro do seu campo de visada. As principais características do IRIS são:

- Campo de visada: 14 x 4°
- Resolução espectral: 2 nm (300 – 1100 nm) e 4 nm (1100 – 3000nm)
- Faixa espectral de operação: 300 a 3000 nm
- Tempo de aquisição: 10s até 4 min.
- Unidade controladora: micro laptop dedicado
- Dados/registo: digital/disquete 3,5 pol.
- Energia: bateria recarregável (12 e 6 VDC)
- Fabricante: GER. corp. – USA

Capítulo 8

Sistemas sensores utilizados em nível suborbital

O nível suborbital de coleta de dados por sensoriamento remoto geralmente tem como plataforma as aeronaves tripuladas. Entre os principais equipamentos sensores aerotransportados, existem as câmeras fotográficas, os imageadores (“scanners”) e os radares. Operacionalmente, o mais importante sensor é a câmera fotográfica, que obtém dados de alta qualidade numa faixa do espectro eletromagnético que vai de 350 a 900 nm. Entretanto, nos últimos anos foram desenvolvidos os espectrômetros de imageamento hiperespectrais que são instrumentos com capacidade de adquirir uma imagem para cada banda espectral, dentro da faixa do espectro eletromagnético em que opera. Esse equipamento, embora utilizado de forma experimental no Brasil, apresenta um potencial muito grande para o uso operacional nas próximas décadas. Mais recentemente tem sido empregada as câmeras de vídeo para imageamento em áreas ocupadas com floresta na região amazônica. No Brasil, essa metodologia, ainda que na fase de pesquisa, apresenta uma aplicabilidade muito boa para as estimativas de áreas agrícolas através de sistema de amostragem. Com as câmeras videográficas podemos obter uma imagem digital dos alvos contidos dentro dos segmentos que compõem a amostra de área de um determinado delineamento estatístico. Isso, poderia, então substituir a fotografias aéreas na fase de coleta de informações no campo, conforme é utilizado, por exemplo, no Sistema de Previsão de Safras (PREVIS) utilizado pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

Fora os imageadores hiperespectrais e a videografia, os outros tipos de imageadores e os radares são mais utilizados em satélites orbitais não tripulados. Quando aerotransportados, o objetivo principal é voltado à pesquisa básica para conhecimento do comportamento espectral de alvos da superfície terrestre, ou para teste de simulação dos dados a serem obtidos ao nível orbital. Assim, neste capítulo, discutiu-se com maiores detalhes os sensores fotográficos e os radiômetros hiperespectrais.

8.1 Sensores Fotográficos

Sensores fotográficos são todos os dispositivos que, através de um sistema óptico (conjunto de lentes), registram a energia refletida pelos alvos da superfície da Terra em uma película fotossensível, ou seja, o detetor tradicionalmente chamado de filme fotográfico.

Para o sensoriamento remoto, os sistemas fotográficos mais utilizados são aqueles aerotransportados. Dentre eles podemos citar as câmeras métricas. Os produtos obtidos por estes

sistemas são as fotografias aéreas, que podem ser pancromáticas (preto e branco), coloridas normal ou falsa cor. Na Figura 8.1, pode ser vista uma plataforma suborbital (aeronave), uma câmera métrica e os diferentes produtos obtidos.

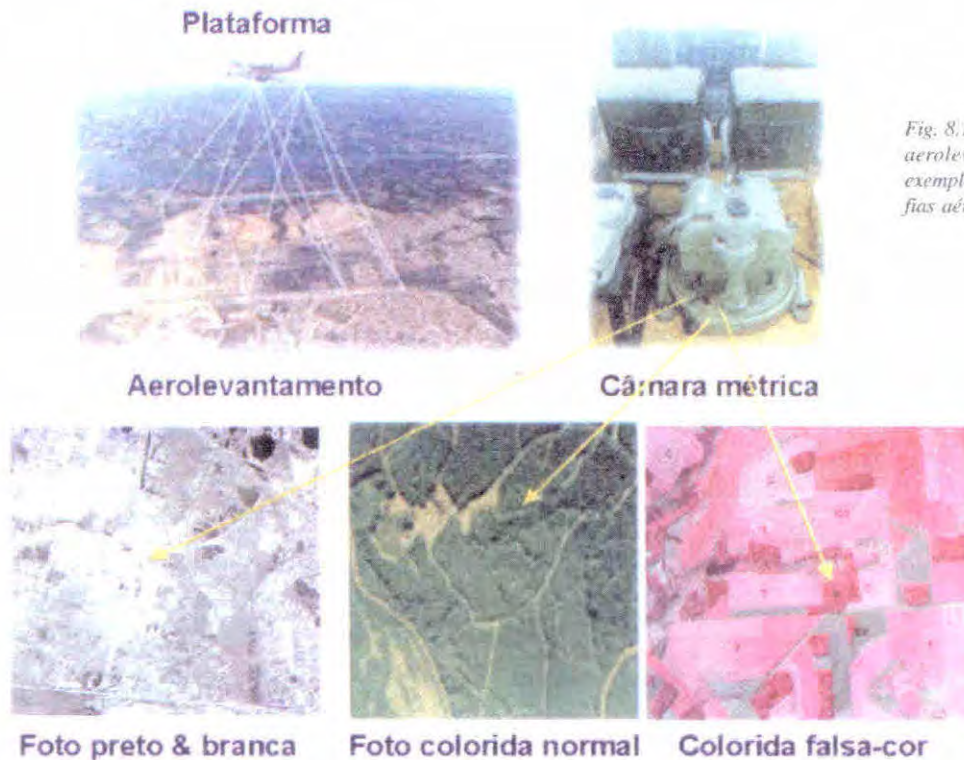


Fig. 8.1 – Sistema de aerolevanteamento e exemplos de fotografias aéreas.

A quantidade de informações, que podem ser extraídas das fotografias aéreas, é, basicamente, função da época de aquisição, da correta definição da escala das fotografias e do tipo de filme empregado. Cada um destes parâmetros está intimamente ligado ao custo e um bom planejamento.

8.1.1 - Tipos de Filmes

Os filmes fotográficos são detetores capazes de responder à radiação eletromagnética em determinadas faixas do espectro eletromagnético. A sensibilidade espectral de um filme oscila entre 350 nm (ultravioleta) e 900 nm (parte do infravermelho próximo) e depende da quantidade de radiação (tempo de exposição do filme à luz) e não da intensidade do fluxo luminoso como acontece com os detetores utilizados nos sensores não-fotográficos, ou seja, se a intensidade do fluxo de energia for muito alta, o tempo de exposição do filme deve ser pequeno. No caso dos filmes fotográficos, a energia é acumulativa, podendo chegar a saturação, denominada de saturação lúmica.

Os filmes utilizados em sensoriamento remoto podem ser reunidos em dois grandes grupos: filme preto e branco e os filmes coloridos. Quanto a sensibilidade, ambos podem ser subdivididos em: filmes de sensibilidade normal (sensíveis à radiação eletromagnética compreendida entre os comprimentos de ondas de 350 e 700 nm) e os filmes de sensibilidade ao infravermelho próximo (sensibilidade espectral abrange a radiação entre 350 e 900 nm).

8.1.1.1 - Filme preto e branco

Um filme preto e branco ou pancromático é constituído por uma emulsão ou camada de haletos de prata (AgCl , AgBr , AgI), também denominados de sais de prata, sobre uma base plástica transparente, normalmente feita de acetato, e uma camada anti-halo, para absorver a radiação residual que passa pela base plástica, evitando assim, a reflexão desta radiação e uma nova sensibilização dos haletos de prata (Figura 8.2).

FILME PRETO E BRANCO

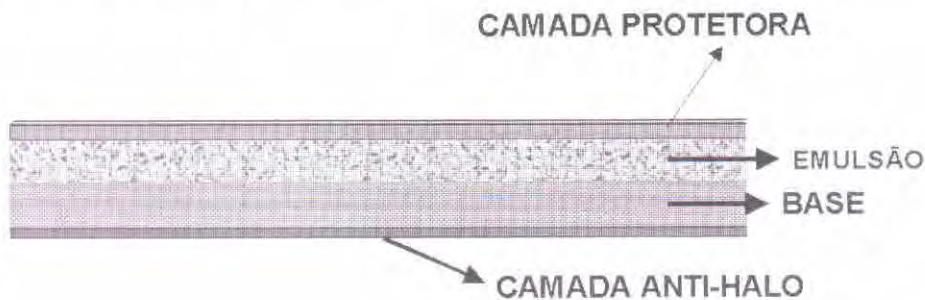


Fig. 8.2 –Esquema para mostrar a estrutura de um filme preto e branco.

Atualmente, no mercado há cinco tipos de filmes:

- Filmes **sensíveis ao azul**.
- Filmes **ortocromáticos** - sensíveis às radiações eletromagnéticas situadas na faixa espectral que vai do azul até o verde (400 a 600 nm).
- Filmes **pancromáticos** - padrão usado nas câmeras fotográficas. São sensíveis desde o ultravioleta (350 nm) até uma parte do infravermelho próximo (até 900 nm).
- Filme **infravermelho** - inicialmente projetado para fins científicos e militares, este filme alcançou popularidade tanto no campo da fotografia amadora quanto profissional, em virtude de permitir fotografar o que os nossos olhos não conseguem ver.
- Filme **Raio X**, para aplicação na medicina e na pesquisa.

Quando a luz atinge o filme, afeta a estrutura básica dos haletos. Quanto maior for a quantidade de luz, maior o número de grãos afetados.

Para tornar visível a imagem formada, após a cena ter sido fotografada, é necessário revelar o filme, ação que consiste em usar um agente químico – **o revelador** – que atua no sentido de transformar os haletos de prata afetados pela luz, em diminutos grãos de prata metálica que aparecerão na cor preta. Os haletos de prata que não foram afetados pela luz não são modificados pelo revelador.

Após o processo de revelação, surge uma imagem negativa no filme. A imagem é negativa devido à prata negra ter sido removida, ficando, assim, áreas claras nos locais de remoção da prata. Posteriormente, ocorre o processo inverso, no qual se obtém a cópia positiva. Nas fotografias, a radiância (energia refletida) dos alvos é representada através da densidade óptica (nível de cinza) que varia de um cinza bastante escuro, para baixos valores de radiância, até cinza claro máximo, para os valores de máxima radiância, conforme é mostrado na Figura 8.3.



Fig. 8.3 – Foto aérea preto e branco contendo objetos representados por diferentes níveis de cinza

8.1.1.2 - Filmes coloridos

Os filmes coloridos podem ser de dois tipos: o colorido normal e o infravermelho colorido, também conhecido por *infravermelho falsa-cor*.

a) Filme Colorido Normal

Um filme colorido normal é um detector formado por três camadas, cada uma apresentando sensibilidades distintas em relação aos diferentes comprimentos de onda (Figura 8.4). A primeira camada é sensível à radiação azul (400 a 500 nm). Logo após esta primeira camada é colocado um filtro amarelo e, em seguida, duas outras camadas, uma sensível à radiação verde (500 a 600 nm) e a outra à radiação vermelha (600 a 700 nm). O filtro amarelo tem função de evitar o registro da radiação azul nas camadas sensíveis à radiação verde e vermelha, uma vez que elas são também sensíveis à luz azul. Este tipo de filme produz fotografias muito semelhantes as imagens observadas pelo sistema visual humano, ou seja, permitem associar a cor da fotografia às cores dos objetos fotografados, principalmente se o processamento fotográfico for bem realizado.

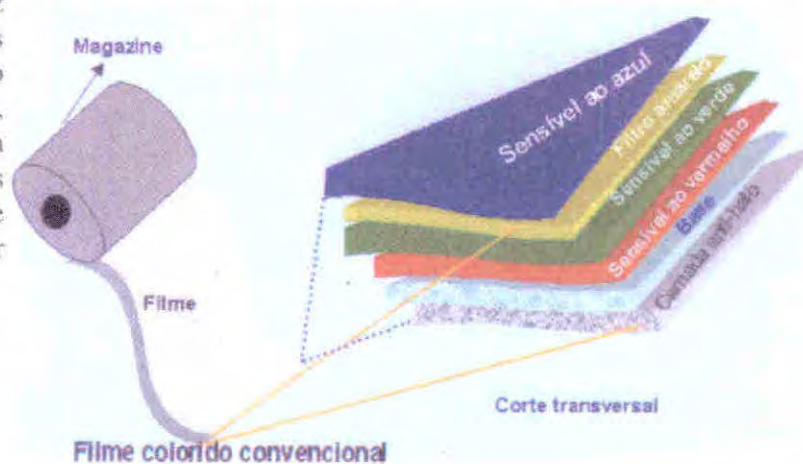


Fig. 8.4 – Estrutura de um filme colorido convencional

Para fotografias aéreas, obtidas com câmeras fotográficas nos formatos 35 mm e 70 mm, geralmente utilizam-se filmes coloridos em transparência positiva (“Slide”), devido à facilidade de processamento, além de ser um filme com alto poder de resolução pode ser ampliado várias vezes em projetor de transparências. Na Figura 8.5 é mostrada uma foto aérea colorida normal, em que a cor verde representa a vegetação mais exuberante, a cor amarelada representa a vegetação no estágio de senescência e a cor marrom o solo exposto.

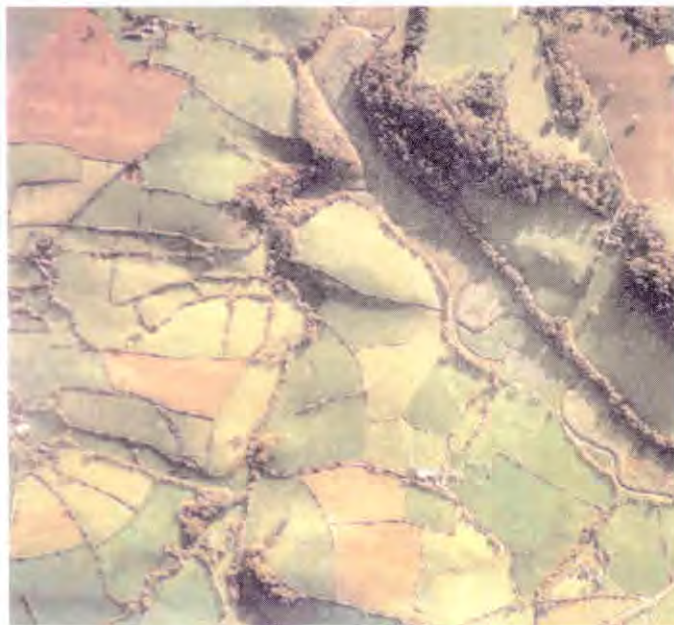


Fig. 8.5 – Foto aérea colorida normal, contendo diferentes objetos de ocupação da superfície terrestre.

b) Filme Infravermelho Colorido

No filme infravermelho colorido, a camada sensível à luz azul é substituída por uma camada sensível à radiação infravermelha e o filtro amarelo é eliminado. Entretanto, nas câmeras fotográficas utilizadas para aerolevanteamento, o filtro amarelo deve ser colocado no sistema óptico, para evitar que a luz azul chegue até o filme e sensibilize-o, uma vez que as três camadas são sensíveis à luz azul.

O filme infravermelho colorido é o mais indicado para aplicações na Agricultura, por ser sensível até o comprimento de onda de 900 nm, que corresponde à região do infravermelho próximo, na qual a vegetação apresenta alta reflectância da energia incidente. Assim, é possível detectar mudanças no

comportamento espectral da vegetação, quando esta estiver submetida a algum tipo de estresse ou quando houver diferenças de índices de área foliar.

Nos filmes infravermelhos coloridos são atribuídas cores que não correspondem às verdadeiras cores da cena. A camada sensível ao verde recebe a coloração azul, a camada sensível à luz vermelha recebe a cor verde e na camada sensível à radiação infravermelha atribui-se a cor vermelha. Com isto, o solo que tem uma coloração avermelhada apresentará, numa fotografia infravermelha colorida (falsacolor), a cor verde. Uma vegetação verde como apresenta dois picos de maior reflectância (um no verde e outro no infravermelho próximo) será representada por duas cores: o azul (representando a radiação verde) e o vermelho (representando a radiação infravermelha). Neste caso, tem-se uma mistura de duas cores primárias, que resultará numa cor secundária denominada magenta. Na Figura 8.6 é mostrada uma fotografia infravermelha, contendo áreas agrícolas, mata natural e solo exposto.

8.2 Sensores Hiperespectrais

Vimos no capítulo 7 que o SPECTRON SE-590 é um espectrorradiômetro que mede a radiação eletromagnética em 256 bandas espectrais, no intervalo de comprimentos de onda que vai de 350 nm a 1100 nm, o que permite traçar curvas espectrais da radiação refletida pelos alvos da superfície terrestre estudados com este sensor. Em outras palavras, é possível estudar, por exemplo, em que comprimento de onda, dentro desta faixa espectral, determinados fatores ambientais afetam a interação da radiação solar com a vegetação. Essa característica confere ao SPECTRON SE-590 uma alta resolução espectral, quando comparado ao sensor TM do Landsat, que opera em apenas 7 bandas espectrais largas do espectro



Fig. 8.6 – Foto aérea infravermelha colorida (falsa-cor) obtida numa região tritícola do município de Cruz Alta, RS, onde T = trigo, C = cevada, SP = solo preparado, PS = pousio e M = mata.

eletromagnético. O produto final é expresso em forma gráfica, de uma medida espectral feita numa amostra do alvo. Este fato impossibilita analisar o alvo como um todo, porque as medidas radiométricas são feitas em pequenas áreas amostrais. Além disso, pela forma de aquisição dos dados pelo SPECTRON SE-590, eles não podem ser transformados em imagens, como ocorre, por exemplo, com os dados obtidos pelo sensor ETM+ do Landsat-7. Mesmo assim, o equipamento é muito prático para experimentação em áreas pequenas porque, geralmente, elas são controladas dentro de um critério de experimentação, onde apresentam a melhor uniformidade possível.

Os sensores hiperespectrais têm uma abordagem de operação bastante similar ao SPECTRON SE-590, isto é, medem a radiação refletida pelos alvos em muitas bandas espectrais, dentro do intervalo de comprimento de onda considerado (o número de bandas espectrais varia de sensor para sensor). No entanto, eles diferem do SPECTRON SE-590 em pelos menos dois aspectos: quanto ao processo de medição e quanto ao produto de saída.

Os sensores hiperespectrais registram a radiação refletida pelos alvos contidos numa área no terreno (faixa), em forma de imagem, cuja largura e comprimento da faixa imageada, dependem do sensor utilizado e da altura de voo. Para cada elemento de resolução “*pixel*”, o sensor é capaz de registrar a radiação refletida pelos alvos em 200 ou mais bandas espectrais. Como ele é um sensor que registra a radiação de todos os alvos dentro da faixa de imageamento no terreno e, ao longo da linha de voo, é possível gerar produtos em forma de imagens, tantas quantas forem às bandas espectrais em que ele opera. O AVIRIS, que é um sensor hiperespectral opera em 224 bandas espectrais entre 400 nm e 25000 nm (0.4 a 2,5 μ m). A título de comparação, observe os dados da Tabela 8.1 sobre o AVIRIS e o sensor Thematic Mapper (TM) do Landsat. Note que enquanto o sensor TM fornece 7 imagens na faixa espectral que vai de 450 nm a 125.000 nm (0.45 a 12.5 μ m), o AVIRIS fornece 244 imagens numa faixa espectral que vai de 400 nm a 25000 nm. Com isso, a chance de sucesso em identificar diferenças espectrais entre dois alvos quaisquer é muito maior nos dados coletados pelo sensor AVIRIS do que nos dados obtidos pelo TM.

Tabela 8.1– Comparação entre o sensor hiperespectral aviris e o TM do Landsat.

SENSOR	FAIXA ESPECTRAL (nm)	BANDA ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPECTRAL (nm)	LARGURA DE FAIXA IMAGEADA (km)	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m ²)
AVIRIS	400 a 2500	224	10	11	20
TM	450 a 12500	7	variável	185	900 e 14.400

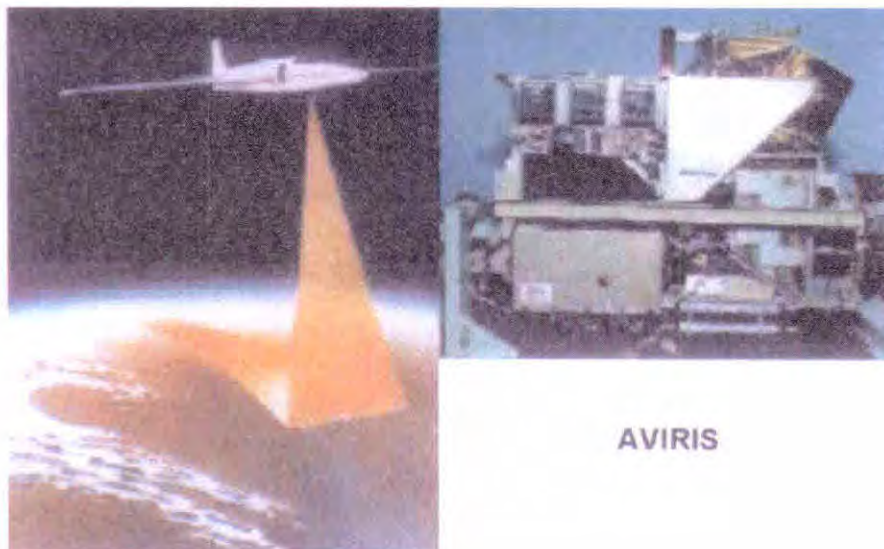
O primeiro sensor hiperespectral aerotransportado foi relatado num artigo publicado por Vane e Goetz (1988), denominado *Airbone Imaging Spectrometer* (AIS). O AIS operava na faixa espectral entre 700 e 2500 nm, registrando a energia proveniente dos alvos terrestre em 128 bandas espectrais. Logo em seguida, foram construídos dois outros espectrômetros que operavam na faixa espectral entre 400 e 1000 nm, que receberam a denominação de *Flourescence Line Imager* (FLI) e *Advanced Solid State Array Spectroradiometer* (ASAS).

Em princípio, estes dois sensores foram desenvolvidos para operarem em aeronave. Entretanto, hoje em dia, há projetos de construção destes sensores tipos de sensores para serem colocados em plataformas orbitais. Entre os sensores aerotransportados os mais utilizados são o AVIRIS e o HYDICE.

8.2.1 – Aviris

O AVIRIS (*Airbone Visible Infrared Imager Spectroradiometer*) foi desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) em 1983, como o primeiro sistema de imageamento, para adquirir dados em bandas estreitas e contínuas através da porção refletida do espectro eletromagnético (380 a 2500 nm). Tornou-se operacional em 1989 e tem sido extensivamente utilizado nos países das Américas do Norte e Central e Europa (Vane et al., 1993).

O AVIRIS possui uma resolução espectral de 10 nm, coleta dados de radiância em 224 bandas contínuas, dentro de uma faixa de imageamento no solo de 11 km de largura. Cada elemento de resolução do sistema cobre uma área aproximada de 20m² de área no terreno (Figura 8.7)



AVIRIS

Fig. 8.7 – Simulação de um imageamento utilizando o espectrômetro AVIRIS.
 FONTE: http://makalu.jpl.nasa.gov/html/aviris_overview.html

Cada 512 linhas escaneadas produzem um arquivo de 140 MB e corresponde a uma cena que tem aproximadamente o comprimento de 10 km no terreno.

Os detectores do AVIRIS são de silício (Si), para registrar a radiação eletromagnética da região do visível, e Índio-Antimônio (InSb), para a região do infravermelho. Outras características do AVIRIS são:

- Taxa de varredura: 12 Hz
- Resfriamento dos detectores: nitrogênio líquido
- Campo de visada total : 30°
- FOV : 1 mrad

Na Figura 8.8 é mostrado um esquema do AVIRIS com os seus principais componentes.

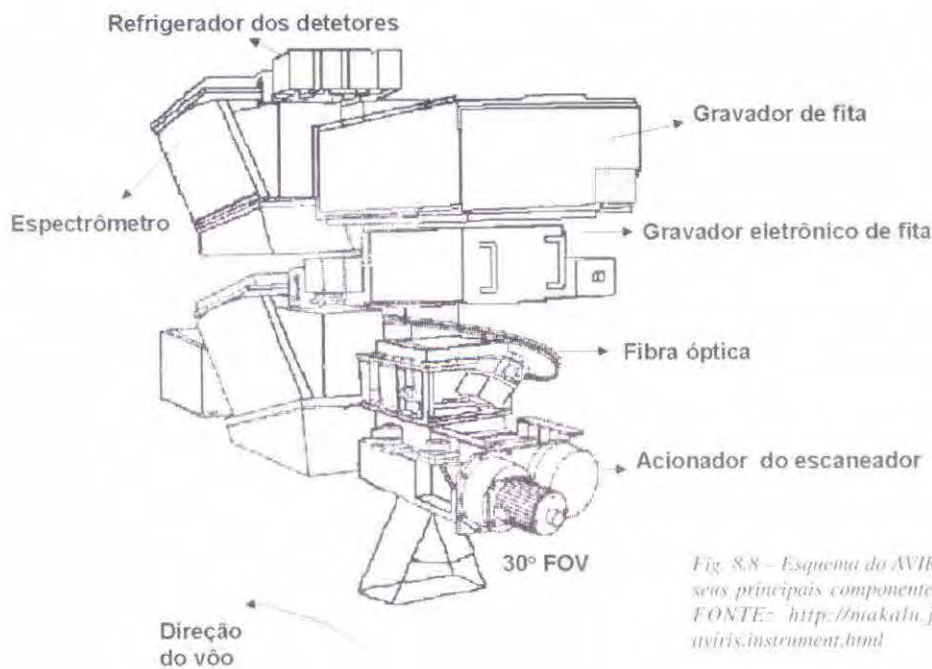


Fig. 8.8 – Esquema do AVIRIS, para mostrar os seus principais componentes.
FONTE: <http://makalu.jpl.nasa.gov/html/aviris.instrument.html>

8.2.2 – Hydice

O HYDICE (*Hiperespectral Digital Imaggery Collection Experiment*) é um sistema de imageamento hiperespectral, aerotransportado, com um espectrômetro de prisma, incluindo um plano focal monolítico ordenado, que cobre a região espectral entre 400 e 2500 nm, com um único detector. Utiliza um sistema de varredura eletrônica e produz imagens em 210 bandas espectrais, com resolução espacial que varia de 1 a 3 m, dependendo da altura do voo. Possui resolução espectral (largura de banda) de 3 a 15 nm, (Richard e Landers, 1993)

O HYDICE representa um significativo avanço nos sensores de imageamento hiperespectral, pois combina elevada relação sinal/ruído com melhores resoluções espacial e espectral e melhor precisão radiométrica, quando comparado com outros sistemas aerotransportados. Na Figura 8.9 são mostrados o sensor HYDICE e todo suporte lógico para sua operação e na Figura 8.10 pode ser visto padrões espectrais e duas imagens falsa cor formadas pela combinação espectral de diferentes bandas de atuação do sensor.

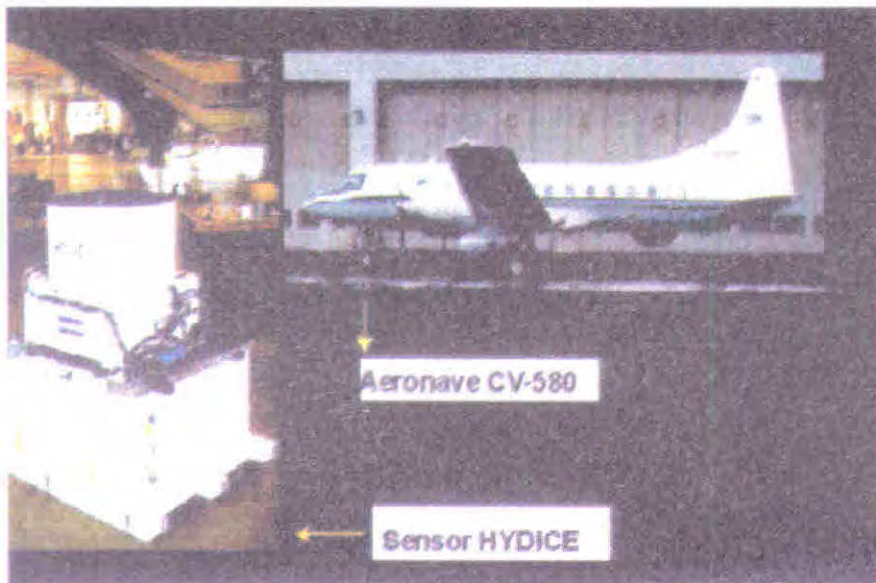


Fig. 8.9 – Foto da sensor HYDICE e da plataforma (aeronave CV-580)

FONTES: <http://www.soils.umn.edu/~pgowda/MRCC/sld006.htm>

Características do sensor HYDICE:

- Resolução espacial: 1 a 4 metros
- Resolução espectral: 10 nm
- Resolução radiométrica: 16 bit
- Largura da faixa imageada: 308 pixels

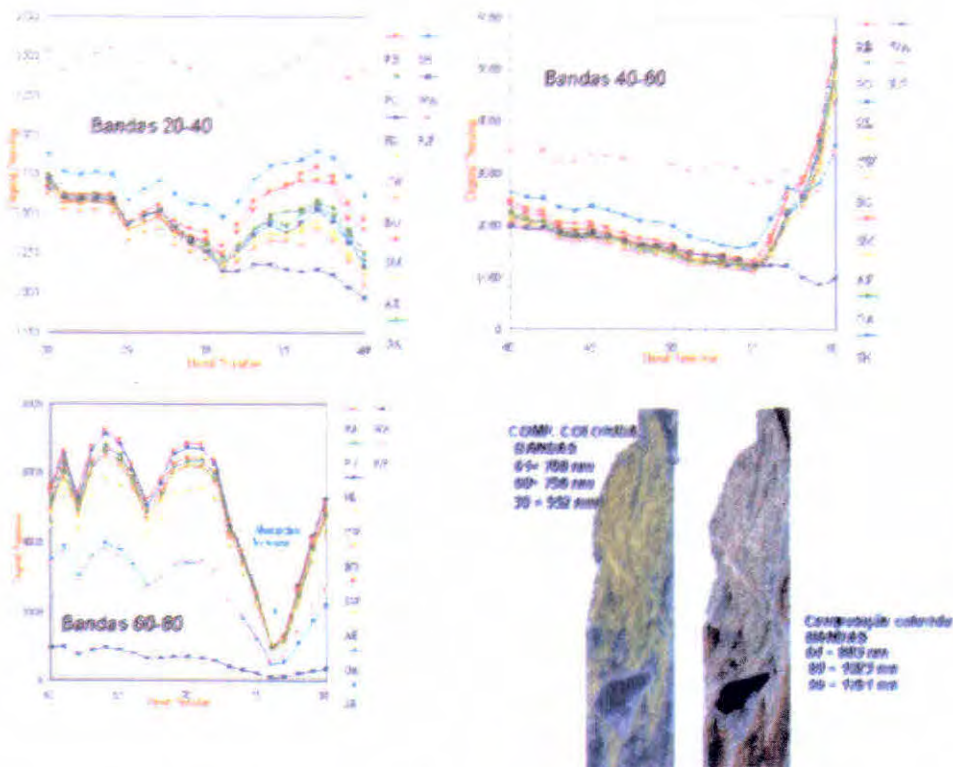


Fig.8 10 – Perfis espectrais de diferentes alvos e imagens obtidos com o sensor Hydice em diferentes bandas do espectro eletromagnético RB = rio, PO = pinus, CW = algodão, BO =carvalho, WA = água, RUP = rodovias, parques e loteamento, SH = arbusto, AE = "american ELM", SM = "Silver Maple".

FONTES: <http://www.soils.umn.edu/~pgowda/MRCC/sld006.htm>

8.3 Videografia

A videografia é um novo método para aquisição suborbital de dados, para auxiliar na interpretação de produtos coletados por sensores orbitais. Esta metodologia permite o levantamento de um grande volume de informações de alta resolução, em curto espaço de tempo e a baixo custo. Embora a videografia seja uma técnica já bastante utilizada em outros países, dentre eles os Estados Unidos da América, no Brasil é uma tecnologia muito recente. Um dos primeiros escritos sobre o emprego da videografia no Brasil, que detalha minuciosamente esta metodologia, inclusive relatando um estudo feito na região amazônica é de Correia (1999). Este relatório (não publicado) foi elaborado para ser apresentado na Diretoria do Serviço Geográfico (DSG). Toda abordagem descrita a seguir foi baseada neste relatório.

Apesar de ser uma técnica nova no Brasil, a videografia deslumbra um futuro bastante promissor no que concerne à obtenção de informações complementares aos estudos com dados orbitais, principalmente, devido à grande extensão territorial do país, que, geralmente, envolve áreas muito extensas, por exemplo, os estudos sobre o desmatamento da Amazônia, mapeamento de cana-de-açúcar, mapeamento de áreas cafeeiras, etc.

Segundo Correia (1999), o uso da videografia no Brasil começou no ano de 1997, em Manaus, com o objetivo de verificar a eficiência do sistema em documentar as áreas videografadas e, também, para verificar a viabilidade de utilizar este sistema para obter informações biofísicas da floresta, que pudessem servir para calibrar dados orbitais. Segundo ainda o autor, outro trabalho envolvendo o uso da videografia foi realizado em Roraima, no ano de 1998, para avaliar a extensão da área destruída pelo incêndio que ocorreu no final de 1997 até março de 1998. No caso específico de Roraima, a videografia foi empregada mais no sentido de substituir dados de satélite, nas áreas onde não foi possível adquirir imagens orbitais livres de cobertura de nuvens.

Mais recentemente, foi realizado um sobrevôo em diversas áreas da Amazônia, como parte do Projeto LBA (Projeto com finalidade de entender o ecossistema amazônico, fruto de uma cooperação Brasil-Estados Unidos). No LBA utilizou-se o método da videografia para a coleta de verdade terrestre e estimativa da fitomassa.

8.3.1 – Características dos Equipamentos de Videografia

Uma das configurações do sistema videográfico que foi utilizada na primeira missão no ano de 1997, em Manaus-AM, era composta pelos seguintes equipamentos:

- Uma câmera de vídeo digital CANON XL1, com lentes telefoto de 5.8-88 mm (*zoom angle*);
- Uma câmera de vídeo digital CANON XL1, com lentes *wide-angle* de 3.4-10.2 mm (*wide-angle*);
- GPS diferencial em tempo real com 12 canais (receptor TRIMBLE AGGPS e antenas banda-L Omnistar e GPS);
- Um sistema para determinação da atitude do avião (*WATSON Attitude and Heading Reference System - AHRS BA303 das indústrias WATSON*);
- Um perfilador Laser altímetro (*Profiling Laser Altimeter – Laser Atlanta*);
- Um gerador de código de tempo (*Time code*) HORITA GPS;
- Um gravador de código de tempo (*Time stamp*); e
- Dois mini gravadores de vídeo digital (mini-DV recorders SONY DV-G900);

Na Figura 8.11 é mostrado um diagrama esquemático dos equipamentos utilizados num sistema de videografia.

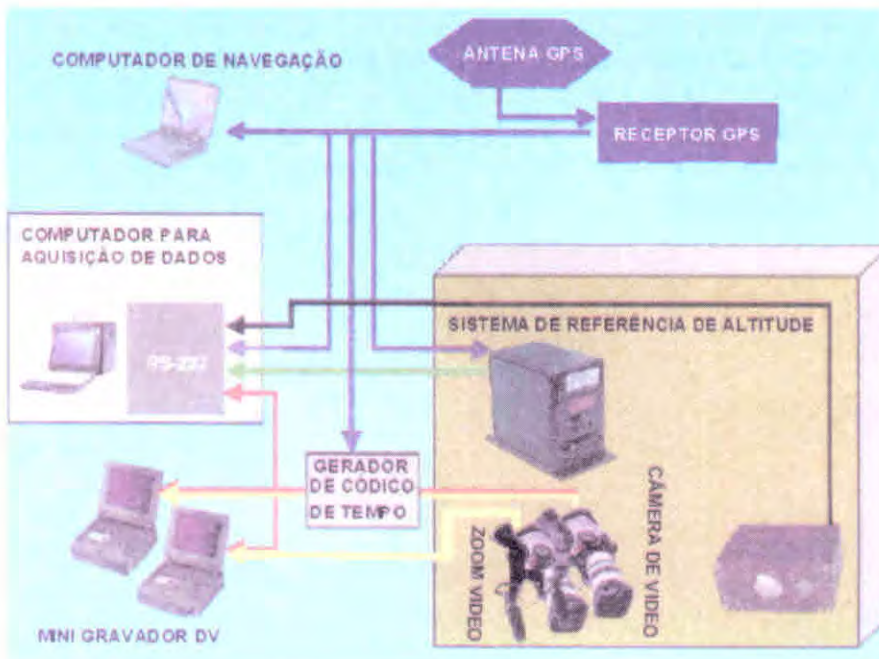


Fig. 8.11 - Configuração de um sistema de videografia. FONTE: Adaptada de Correia (1999).

A câmera CANON XL1 (Figura 8.12A) é um sistema de vídeo digital baseado em três CCD de 1/3" e um prisma dicróico, permitindo a geração e a gravação de imagens coloridas de formato digital em fitas magnéticas mini DV. As principais características dessa câmera são:

- Dimensões: 223mm x 214mm x 415mm
- Peso (completa): 2.86 Kg;
- Tamanho do pixel: 72m²;
- Sistema de focalização automática TTL;
- Temperatura de operação: 0° a 40°C;
- Gravação de áudio digital (12 ou 16 bit PCM);
- Padrão de cor NTSC;
- Tempo de exposição máximo de 1/15.000 Seg;
- Sensibilidade de no mínimo 2 lux;
- Gravação em fita digital de 1 ou 2 horas; e
- Alimentação por bateria de NiCd ou 110VAC.

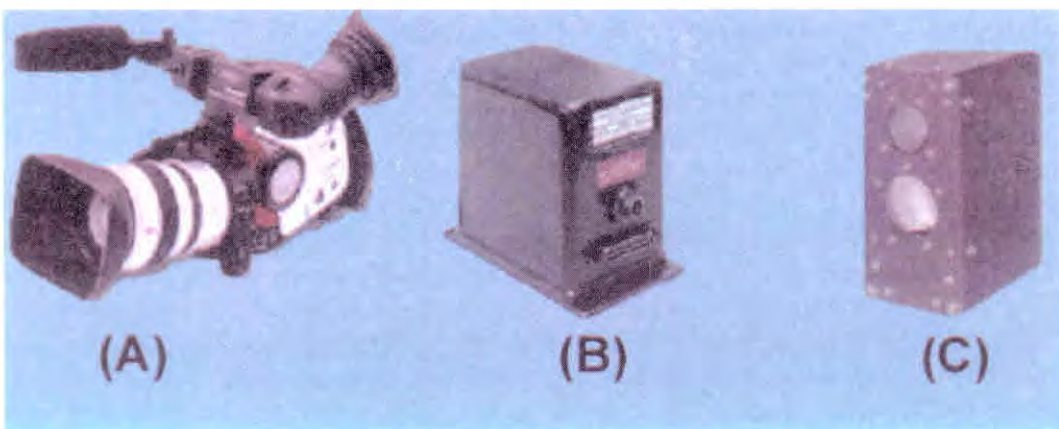


Fig. 8.12 - Câmera de vídeo digital CANON XL1(A), Watson Attitude and Heading Reference System (B) e Profiling Laser Altimeter (C). FONTE: Adaptada de Correia (1999)

Neste sistema foram utilizadas duas câmeras digitais de vídeo CANON XLI (*wide-angle* e *zoom*). A câmera com *wide-angle* fornece informações sobre a distribuição espacial dos objetos que estão sendo filmados, enquanto que a câmera de *zoom* (10x da *wide-angle*) fornece informações detalhadas dos objetos que estão sendo filmados e que estão localizados no centro da faixa gerada pela câmera com *wide-angle*. Um exemplo das imagens fornecidas pelas duas câmeras pode ser visto na Figura 8.13.



Fig. 8.13 – Exemplo de dois frames: *wide-angle* (a esquerda) e *zoom* (a direita).

FONTE: Adaptada de Correia (1999)

Essas câmeras produzem uma faixa de vídeo contínua. Através de dois mini-gravadores SONY DV-G900, esta faixa produzida é duplicada ainda dentro da aeronave. No momento da gravação dos dados, a aeronave sofre constantes alterações de atitude e desta forma não se obtém uma visada perfeitamente vertical. Devido a isto, utiliza-se o *Watson Attitude and Heading Reference System - AHRS BA303* (Figura 8.12B), que mede a orientação precisa da aeronave e, por conseguinte, das câmeras e do Laser. A precisão do AHRS é de aproximadamente 0.1° nos dois eixos horizontais (X e Y) e de aproximadamente 0.5° no eixo vertical (azimute).

Para que se obtenham coordenadas em tempo real com uma boa precisão, utiliza-se o GPS diferencial em tempo real (*TRIMBLE AGGPS*) associado a uma antena na banda L (Omnistar), que permite a correção das coordenadas da antena instalada na aeronave, a partir de coordenadas de outros pontos espalhados sobre a superfície da Terra. A precisão absoluta horizontal e vertical do GPS é de aproximadamente 1 e 2 metros, respectivamente.

Devido à variação temporal na gravação dos dados e do GPS, é necessário realizar o registro temporal de várias faixas de dados. Para tal, utiliza-se o gerador de códigos (*time code generator*) HORITA GPS que converte o sinal de tempo GPS para um formato digital que é compatível ao canal de áudio digital dos gravadores das câmeras. Neste caso, a informação do tempo GPS é gravada na trilha sonora das imagens. Também é gravado o áudio digital num computador de aquisição de dados. Com isso, consegue-se um relacionamento máquina-leitura independente entre o número do frame e o tempo GPS.

Os dados do GPS servem para diversas funções, incluindo: compensação de velocidade para o AHRS, sincronização dos dados de vídeo adicionando a informação de tempo à trilha sonora e à navegação. Os dados GPS também são gravados diretamente no computador de aquisição de dados.

A utilização do *Profiling Laser Altimeter- PLA* (Figura 8.11C), serve para fornecer a distância entre a aeronave e o terreno. Essas medidas são referenciadas ao centro da faixa que está sendo filmada, proporcionando a obtenção de perfis de altura no centro da faixa, conforme mostrado na Figura 8.14.

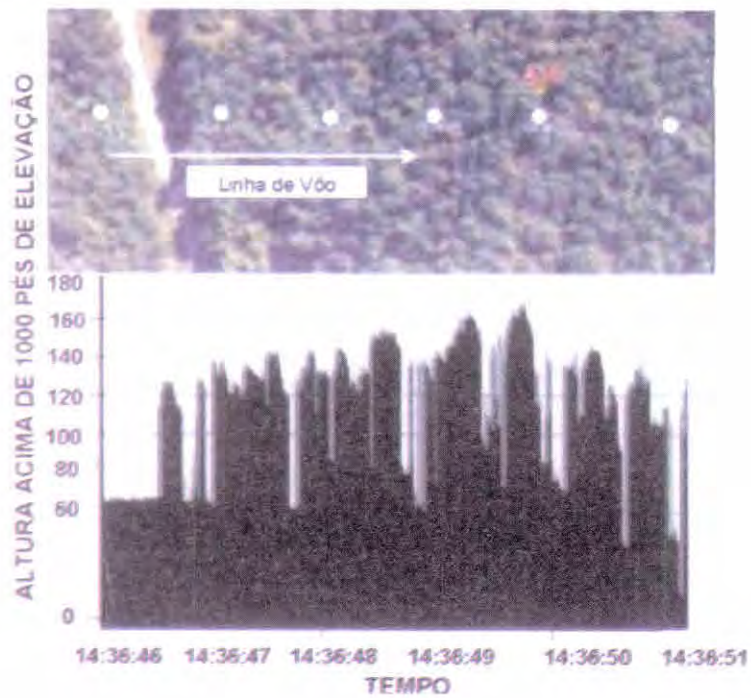


Fig. 8.14 – Exemplo de um perfil de altura da vegetação no centro da faixa, de vôo, obtido pelo PLA. FONTE: Adaptada de Correia (1999).

Os dados do PLA, AHRS, GPS e *time code generator* são gravados através de portas seriais no computador de aquisição de dados. Cada instrumento possui diferentes taxas de amostragem e transferência de dados, conforme mostrado na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Taxa de amostragem e transferência para os instrumentos digitais

INSTRUMENTOS	TAXA DE AMOSTRAGEM (HZ)	TAXA DE TRANSFERÊNCIA
<i>Profiling Laser Altimeter (PLA)</i>	238	19.2K
<i>Attitude and Heading Reference System (AHRS)</i>	11.8	9600
<i>Global Position System (GPS)</i>	1	9600
<i>GPS Video Time Code (HORITA)</i>	30	9600

Capítulo 9

Sensores utilizados para coleta de dados em nível orbital

A idéia de desenvolver um sistema sensor, para registrar a radiação refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre, a partir de plataformas orbitais, surgiu após a análise das primeiras fotografias tiradas da Terra, durante os programas Mercury e Gemini. Para tanto, esses sistemas sensores deveriam ser capazes de produzir imagens instantâneas do terreno, de forma semelhante aos sistemas fotográficos que foram usados nos programas Mercury e Gemini. Desta maneira, foi concebido o sistema RBV (Return Beam Vidicon), semelhante a uma câmera de televisão que permitia o registro instantâneo de uma certa área do terreno. O RBV operou nos dois primeiros satélites da série Landsat, em três bandas espectrais e, no Landsat-3, com apenas um canal pancromático, com resolução espacial de 40m x 40m (*pixel*). A Tabela 9.1 contém algumas características do sistema RBV, que fez parte da carga útil dos satélites Landsat-1 e 2, (Novo, 1989).

No RBV, a energia proveniente da área imageada provocava um estímulo elétrico numa superfície fotossensível do tubo da câmera e, durante um certo tempo, a entrada de energia era interrompida por um obturador, para que a imagem do terreno que havia sido imageada fosse varrida por um feixe de elétrons. O sinal de vídeo era então transmitido por telemetria.

Tabela 9.1 – Características do sistema RBV

CANAL	FAIXA ESPECTRAL (nm)	REGIÃO ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPECIAL (m x m)
1	475 – 575	AZUL-VERDE	80
2	580 – 680	VERDE – VERMELHA	80
3	690 – 830	VERMELHO – IV/PRÓXIMO	80

Após a concepção do RBV, muitos outros sistemas sensores orbitais foram desenvolvidos, para fins de coleta de informações de recursos naturais. Discutiremos a seguir, os princípios de funcionamento de alguns desses sistemas sensores mais conhecidos no nosso meio.

9.1 Imageadores Eletro-Óptico-Mecânico

Os imageadores eletro-óptico-mecânicos basicamente são constituídos por um conjunto de espelhos giratórios ou prismas, para coletar a radiação eletromagnética proveniente dos alvos da superfície imageada; um sistema óptico, capaz de focar a energia coletada sobre detetores, que a convertem em um sinal elétrico (Figura 9.1).

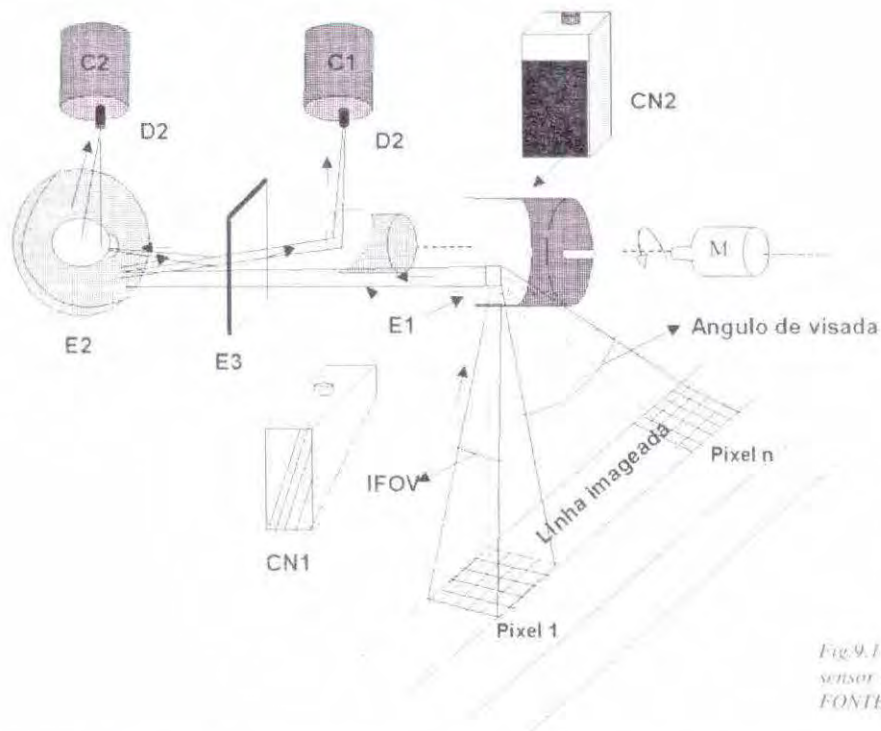


Fig.9.1 – Esquema de um sistema sensor eletro-óptico-mecânico
 FONTE: adaptado de NASA (1976).

Princípio de funcionamento: a radiação eletromagnética proveniente dos alvos contidos dentro da faixa de terra imageada pelo sensor é coletada, inicialmente, pelo espelho giratório E1 (movimentado pelo motor M) e refletida para um segundo espelho parabólico E2. No espelho parabólico a radiação sofre nova reflexão indo atingir o espelho E3, que é um tipo de filtro que separa a radiação em duas componentes. A primeira componente consiste de radiações de ondas curtas que são transmitidas através do espelho indo incidir no detector D1. A segunda componente corresponde às radiações de ondas longas que são refletidas para o detector D2. Os detectores estão acoplados sob recipientes contendo nitrogênio líquido para refrigerar o sistema. Dois corpos negros CN1 e CN2 são colocados próximos aos espelhos giratórios, os quais emitem radiações sobre eles para calibração do sistema.

Os imageadores eletro-óptico-mecânicos são sistemas com boa resolução espectral e baixa resolução geométrica ou espacial. Nesta categoria englobam-se, entre outros, o imageador MSS (Multispectral Scanner Subsystem) e o TM (Thematic Mapper), ambos constituintes da carga útil dos satélites da série Landsat.

9.1.1 – Sistema Sensor MSS

A rigor, o sistema MSS foi concebido na mesma época do desenvolvimento do sistema RBV. O RBV e o MSS foram os primeiros sistemas sensores colocados em órbita, no ano de 1972, com o objetivo de coletar dados sobre recursos naturais renováveis e não-renováveis da superfície terrestre. Ao contrário do RBV, que fez parte apenas nos três primeiros satélites da série Landsat, o sistema

MSS foi e ainda é um dos sensores constituintes da carga útil de todos os satélites da série lançados até o momento (Landsat 1,2,3,4,5,6,e 7).

O sistema MSS é composto de um espelho oscilante, uma parte óptica e um sistema detetor, que registra a radiação eletromagnética refletida pelos alvos da superfície terrestre, em quatro faixas ou bandas espectrais. Para cada faixa espectral há 6 detetores, permitindo, assim, imagear 6 linhas no terreno ao mesmo tempo.

Os detetores produzem uma voltagem (entre 0 e 5 volts), que é proporcional à quantidade de radiação que chega até eles, proveniente dos alvos contidos nas linhas imageadas. A voltagem produzida é um sinal analógico que é convertido em valores digitais (quantizados) ou níveis de cinza variando de 0 a 63. Essa conversão representa a radiância ou brilho de cada alvo na área imageada. Na Figura 9.2 é mostrado um esquema da configuração básica do sistema sensor MSS.

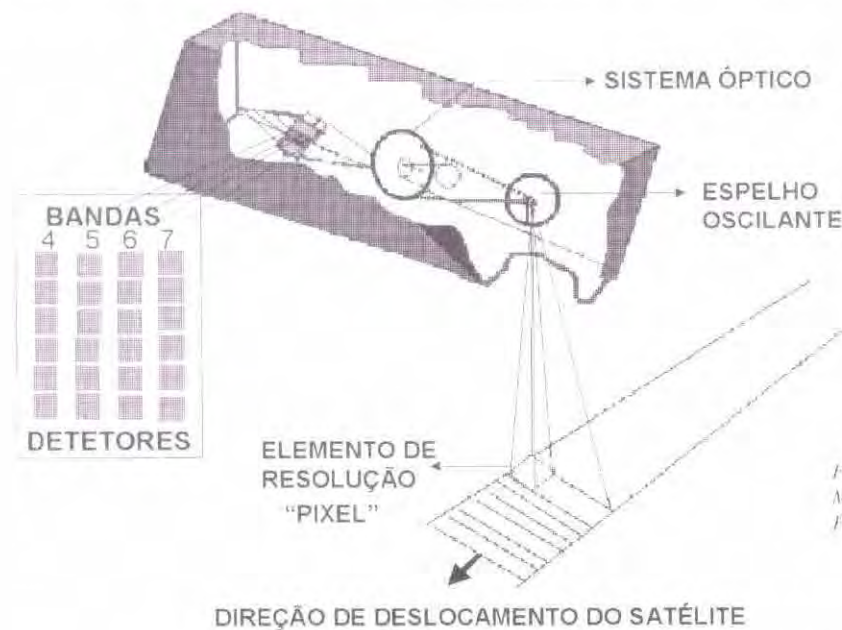


Fig. 9.2 Esquema do imageador MSS e as partes constituintes.
 FONTE: adaptada de NASA (1976).

Nos três primeiros satélites (Landsat 1, 2 e 3), o sistema MSS foi colocado em órbita a uma altitude de 920 Km. Para dar uma volta em torno da Terra o satélite gastava 103 minutos e 27 segundos, totalizando, ao final de um dia, 14 faixas imageadas com largura de 185 km. Os satélites giravam numa órbita síncrona com o sol com um ângulo de inclinação em relação ao equador de $99^{\circ}11'$, fazendo com que a órbita fosse quase polar em torno da Terra.

A configuração da órbita dos três primeiros satélites foi estabelecida de tal modo que, a cada 18 dias, o sistema MSS imageava a mesma região da superfície terrestre, que havia sido imageada há 18 dias atrás, atribuindo assim uma resolução temporal ao sistema de 18 dias. Na Figura 9.3 pode ser vista a plataforma dos três primeiros satélites da série Landsat e um esquema do satélite com os seus principais componentes. Na Tabela 9.2, estão contidas informações sobre largura da faixa espectral, região do espectro e resolução espacial de cada conjunto de detetores que compõem o sistema MSS.

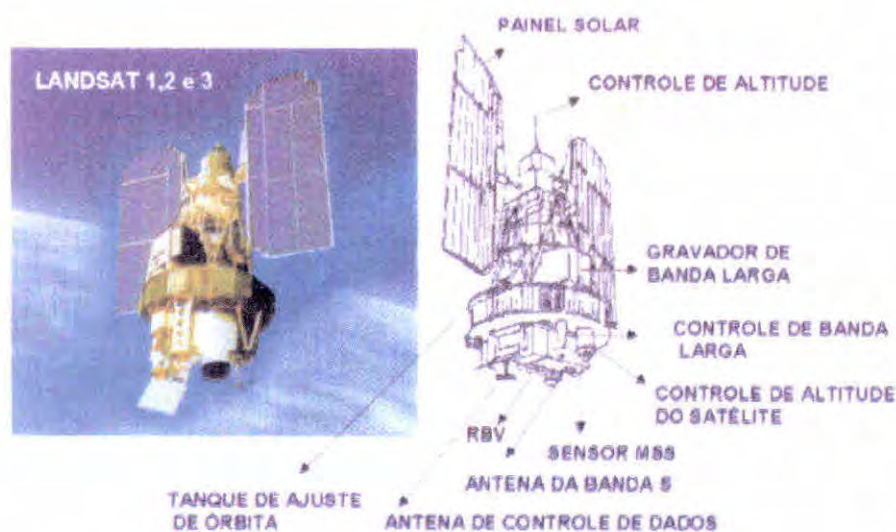


Fig. 9.3 – Foto da plataforma dos satélites Landsat 1, 2 e 3. FONTE: EOSAT (1992).

Tabela 9.2 – Característica espectrais e espaciais do sensor MSS

Banda	FAIXA ESPECTRAL		REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m x m)
	nm	µm		
4	500 – 600	0,5 – 0,6	VERDE	80
5	600 – 700	0,6 – 0,7	VERMELHO	80
6	700 – 800	0,7 – 0,8	IVPróximo	80
7	800 – 1100	0,8 – 1,1	IVPróximo	80

Os detetores utilizados no MSS são tubos fotomultiplicadores para as bandas 4, 5 e 6 e, para a banda 7, emprega-se a liga metálica de diodo de silício. No Landsat-3, o sensor MSS era composto por mais um conjunto de detetores que operavam na faixa espectral do infravermelho termal (10,4 a 12,6 µm) com resolução espacial de 237m x 237m.

9.1.2 – Imageador TM

A partir do ano de 1984, a NASA colocou em órbita o sensor TM (Thematic Mapper) com as mesmas características do MSS, porém com uma série de melhorias no que diz respeito às resoluções: espectral, espacial, temporal e radiométrica. Este sistema, assim como o MSS, passou a fazer parte da carga útil dos satélites Landsat-4, 5, 6 e 7, sendo que no Landsat-6 o sistema não chegou a operar, por motivo de destruição do satélite durante o lançamento. Na Figura 9.4, está contida a configuração da plataforma utilizada no Landsat 4, com destaque para o posicionamento do sensor TM.

Entende-se como carga útil (“payload”) aqueles equipamentos que estão a bordo do satélite exclusivamente para a coleta de informações sobre a superfície Terrestre (Novo, 1989).

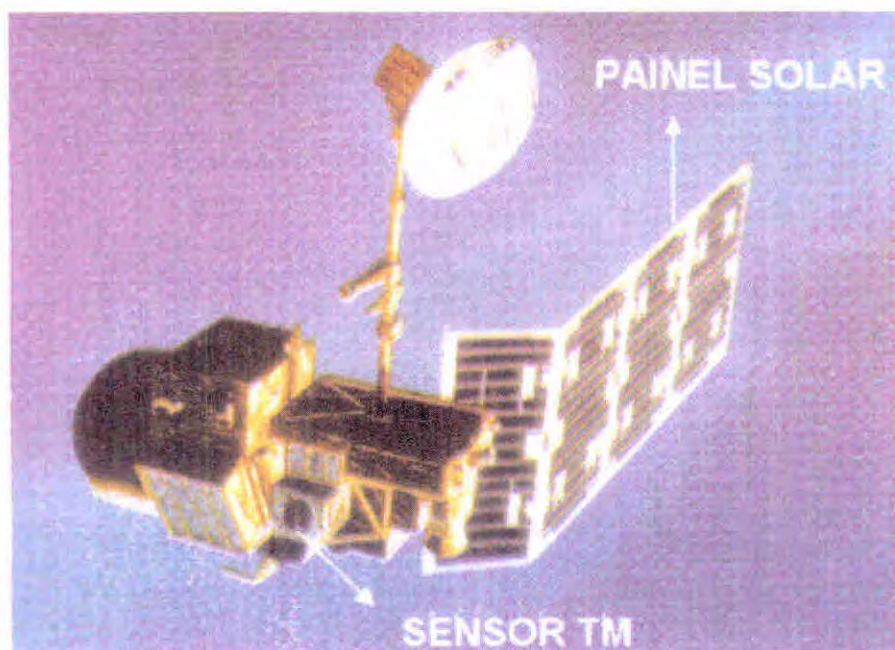


Fig. 9.4 – Foto do satélite Landsat 4 com detalhe para o sensor TM

O sensor TM opera em 7 bandas espectrais do espectro eletromagnético sendo: 3 bandas na região do visível, 3 bandas na região do infravermelho refletido e 1 banda na região termal. A largura de faixa imageada também é de 185 km. A resolução espacial, para os sensores que operam nas regiões do visível e infravermelho refletido, é de 30 m x 30 m e, para o sensor da região do termal é de 120 m x 120 m (Tabela 9.3). No Landsat-7, lançado em 1999, foi adicionado um detetor que opera numa banda pancromática (520 a 900 nm), cuja resolução espacial é de 15m x 15 m. Para as demais bandas espectrais houve algumas modificações conforme são mostradas na Tabela 9.4.

Tabela 9.3 – Características espectrais e espaciais do sensor TM

Banda	FAIXA ESPECTRAL		REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m x m)
	nm	μm		
1	450 - 520	0,45 - 0,52	Azul	30
2	520 - 600	0,52 - 0,60	Verde	30
3	630 - 690	0,63 - 0,69	Vermelho	30
4	760 - 900	0,76 - 0,90	IV/Próximo	30
5	1550 - 1750	1,55 - 1,75	IV/Médio	30
6	10400 - 12500	10,4 - 12,5	IV/Termal	120
7	2080 - 2350	2,08 - 2,35	IV/Médio	30

Na Figura 9.5 é mostrada parte de uma área no Estado do Rio de Janeiro, imageada nas sete bandas espectrais do TM do Landsat-5.

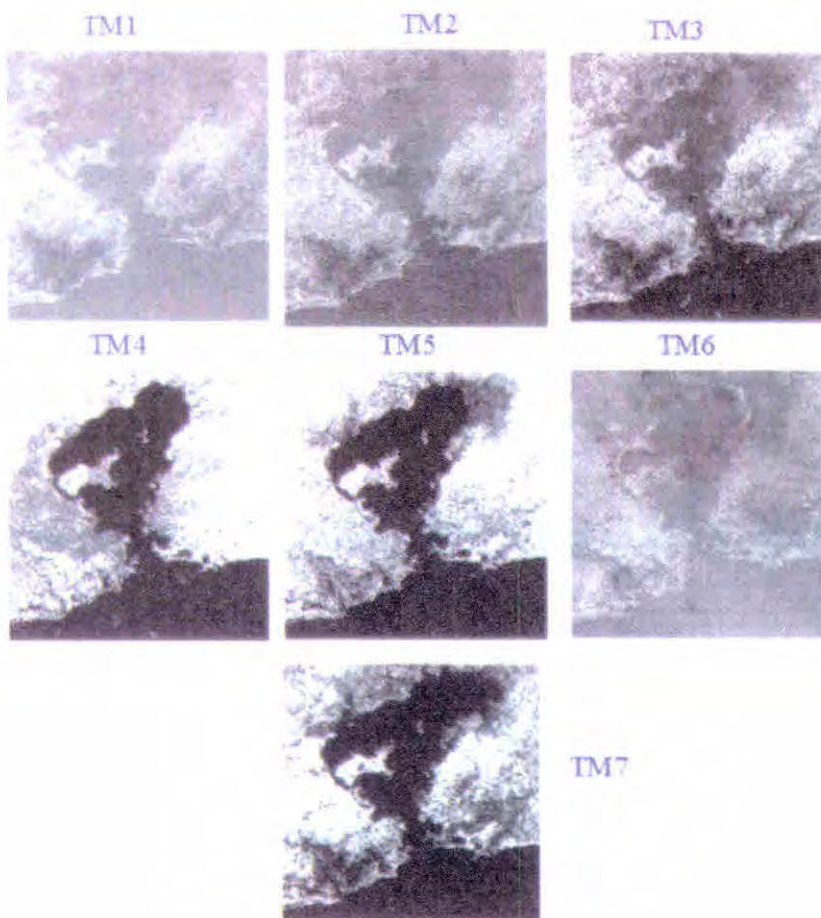


Fig. 9.5 – Imagens de uma área no Estado do Rio de Janeiro, obtida nas sete bandas do sensor TM do Landsat-5.

Tabela 9.4 – Características espectrais e espaciais do sensor ETM + DO LANDSAT-7

Banda	FAIXA ESPECTRAL		REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m x m)
	nm	µm		
1	450 – 520	0,45 – 0,52	AZUL	30
2	530 – 610	0,53 – 0,61	VERDE	30
3	630 – 690	0,63 – 0,69	VERMELHO	30
4	780 – 900	0,76 – 0,90	IV/PRÓXIMO	30
5	1550 – 1750	1,55 – 1,75	IV/MÉDIO	30
6	10400– 12500	10,4 – 12,5	IV/TERMAL	120
7	2090 – 2350	2,08 – 2,35	IV/MÉDIO	30
8 (PAN)	520 - 900	0,52 – 0,90	VIS/IVPRÓXIMO	15

Observa-se, na Figura 9.5, que a intensidade da radiância proveniente dos alvos imageados difere de uma banda para outra. Essa mudança na intensidade da radiância é função da interação da radiação eletromagnética, na faixa considerada, com cada alvo dentro da área imageada.

Na banda TM6 a energia coletada pelo sensor é proveniente de radiação emitida pelos alvos. Desta forma, a gradação de níveis de cinza dos alvos nesta imagem representa diferentes temperaturas

de superfície. Nos demais casos, a gradação de níveis de cinza refere-se à maior ou menor energia refletida pelos alvos na faixa espectral que opera cada sensor.

Enquanto que no sensor MSS há 6 detetores por banda, no TM cada banda espectral da região do visível e do infravermelho refletido é composta por 16 detetores. Para a banda do termal o sensor é composto por um conjunto de 4 detetores. Além disso, no TM a radiância que chega aos detetores é quantizada em 256 números digitais ou níveis de cinza, contra 64 níveis no MSS. A resolução temporal também foi melhorada em relação ao sensor MSS, passando de 18 dias (sensor MSS) para 16 dias.

9.1.3 – Imageador AVHRR

O sensor AVHRR (*Advanced Very High-Resolution Radiometer*) é um imageador multiespectral do tipo varredura transversal (*cross-track*). Opera em 5 bandas espectrais do espectro eletromagnético sendo: uma na região do visível, uma na região do infravermelho próximo e três no termal (Tabela 9.5).

Tabela 9.5 – Características espectrais e espaciais do sensor AVHRR

Banda	FAIXA ESPECTRAL		REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (Km)
	nm	μm		
1	580 – 680	0,58 – 0,68	VISÍVEL	1,1
2	725 – 1100	0,725 – 1,10	IVPRÓXIMO*	1,1
3	3550 – 3930	0,355 – 0,393	IVMÉDIO	1,1
4	10300 – 11300	10,30 – 11,30	IVTERMAL	1,1
5	11500 – 12500	11,50 – 12,50	IVTERMAL	1,1

O AVHRR faz parte dos satélites da série NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, Figura 9.6). Possui um IFOV de 1,4 mrad, uma taxa de 360 varreduras por minuto e um ângulo de imageamento igual a $\pm 56^\circ$. Orbita a Terra à altitude de 833 km, o que proporciona uma resolução espacial nominal de 1,1 km x 1,1 km no nadir e 2,4 km x 6,9 km nos extremos da linha de varredura. A largura da faixa de imageamento é de 2.700 km e o nível de quantização é de 10 bits, resultando numa resolução radiométrica de 1024 níveis de cinza.



Fig. 9.6 – Foto do satélite NOAA

Os dados adquiridos pelo sensor AVHRR são transmitidos para as estações terrestres em dois formatos: o formato GAC (Global Area Coverage) e o LAC/HRPT (Local Area Coverage / High Resolution Picture Transmission).

No formato GAC os dados são processados a bordo do satélite em tempo real e transmitidos em banda VHF. Esses dados dão origem a um novo produto resultante de uma amostragem de 5 colunas por 3 linhas de varredura. A resolução radiométrica de 10 bits é mantida, enquanto que a resolução espacial é degradada para 4,0 km x 4,0 km no nadir.

No formato LAC/HRPT a resolução espacial no nadir é de 1,1 km x 1,1 km e os dados são registrados em 10 bits e transmitidos em banda S em tempo real. Porém, os dados podem ser gravados a bordo do satélite, para posterior transmissão para as estações receptoras. É importante destacar que o volume médio de uma imagem completa LAC/HRPT, no formato de gravação nível 1B (cobrindo quase todo o território brasileiro), é de 60 Mbytes.

O objetivo original do sensor AVHRR era fornecer estimativa de densidade de nuvens e medidas de temperaturas da superfície do mar. Entretanto, no ano de 1981 foi publicado o primeiro trabalho sobre a utilização de dados do AVHRR no uso do solo (Gray e McCrasy, 1981). A partir desse trabalho, os dados do AVHRR passaram a ser utilizados, também, para fins ambientais.

9.2 Imageadores do Tipo CCD

O CCD (*Charge Coupled Device*) é um conjunto de vários detetores, que utiliza a microeletrônica e o silício como material básico, acoplados a um circuito integrado. Esses imageadores operam na faixa espectral entre 400 e 1100 nm.

A grande precisão geométrica, consequência da não utilização da parte mecânica, como utilizado no Landsat, é uma de suas grandes virtudes. Os CCD's podem ser utilizados num arranjo do tipo "push-broom" como é o caso daqueles empregados nos satélites francês SPOT. Esse arranjo facilita o processamento do sinal, reduzindo também a sua ampliação. Como exemplo de imageadores do tipo CCD, a seguir será descrito o HRV do satélite SPOT.

9.2.1 – Imageador HRV

O sistema HRV (*Haut Resolution Visible*) foi concebido para operar em dois diferentes módulos: o módulo multiespectral e o módulo pancromático. No módulo multiespectral o sistema opera em três bandas espectrais do espectro eletromagnético, que são denominadas de XS1, XS2 e XS3, que permitem a aquisição de dados sobre a superfície da Terra nas regiões do visível e infravermelho próximo, com resolução espacial de 20 m x 20 m. No módulo pancromático a resolução espacial é da ordem de 10m x 10m, conforme é mostrado na Tabela 9.6. A partir do SPOT-5, o módulo Pancromático passará a ter uma resolução espacial de 5m x 5m.

Tabela 9.6 – Características espectrais e espaciais do sensor HRV

SENSOR	FAIXA ESPECTRAL		REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m x m)
	nm	µm		
XS1	500 – 590	0,50 – 0,59	VERDE	20
XS2	610 – 680	0,61 – 0,68	VERMELHO	20
XS3	790 – 890	0,79 – 0,89	IVPRÓXIMO	20
PAN	510 – 730	0,51 – 0,73	VISÍVEL E IVPRÓXIMO	10

O imageador HRV foi colocado em órbita em fevereiro do ano de 1986, a bordo do satélite francês SPOT (Système Probatoire de Observation de la Terre). O HRV tem uma resolução temporal de 26 dias, que é o tempo que o satélite SPOT gasta para passar novamente sobre uma mesma área. Assim, como os sensores MSS e TM, o HRV passou a fazer parte de todos os satélites do programa SPOT (atualmente, no satélite de número quatro), cuja plataforma do satélite SPOT - 4 é mostrada na Figura 9.7.

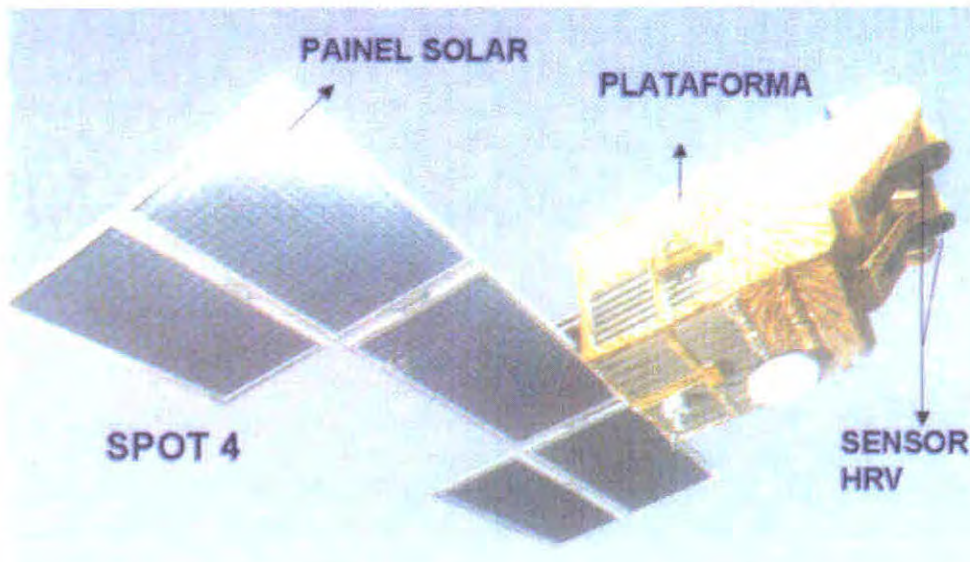


Fig. 9.7 – Foto do satélite SPOT 4 para mostrar a posição do sensor HRV.

Uma das características marcantes do sistema HRV é a possibilidade de coletar informações de alvos da superfície terrestre “off-nadir”, ou seja, apontamento do coletor fora da posição perpendicular à linha de deslocamento do satélite. Esse apontamento varia de $\pm 0,6^\circ$ até $\pm 27^\circ$ em relação ao eixo vertical, conforme é mostrado na Figura 9.8. A variação do ângulo de visada “off-nadir” não é contínua, sendo possível a determinação de 45 ângulos de visada entre 0° e 27° ou de 0° e -27° , com escala de variação de $0,6^\circ$ em $0,6^\circ$.

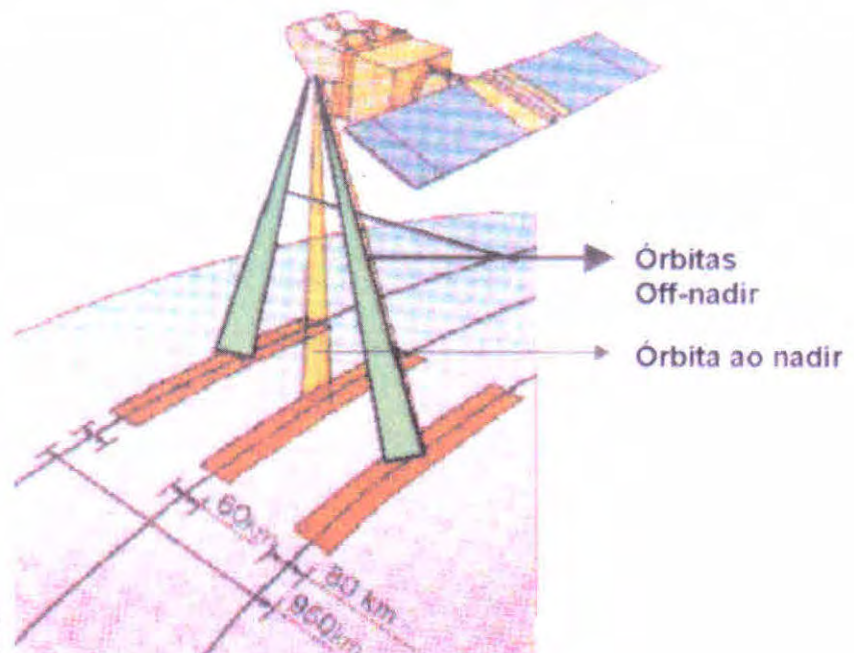


Fig.9.8 – Órbita do SPOT para mostrar o deslocamento off-nadir.

O fato de poder apontar o sensor “off-nadir”, aumenta a resolução temporal do sistema, sobre uma área de interesse que se deseje imagear. Outra vantagem da visada “off-nadir” é a possibilidade de obter imagens com 60 % ou mais de recobrimento lateral, possibilitando, assim, a estereoscopia dos dados imageados. Além disso, aumenta a chance de obtenção de dados livres de cobertura de nuvens.

O sistema HRV possui um espelho plano que recebe a energia proveniente dos alvos contidos no campo de visada (IFOV). Essa energia é transmitida para uma matriz linear de detetores do tipo CCD. Cada matriz consiste em 6.000 detetores arranjados linearmente, formando o que se convencionou chamar de “push-broom”, permitindo o imageamento instantâneo de uma linha completa no terreno (linha da largura da faixa imageada é de 117 km), perpendicularmente ao deslocamento do satélite. No sensor TM a linha é imageada de acordo com o movimento giratório do sensor.

O SPOT orbita a Terra a uma altitude de 832 km, numa órbita polar, síncrona com o sol, mantendo uma inclinação de 98°7' em relação ao plano do equatorial. A largura da faixa imageada no terreno é de 60 km.

9.3 Sensores Orbitais do Programa Espacial Brasileiro

No Brasil, o emprego das técnicas de sensoriamento remoto orbital, para recursos naturais, praticamente teve início logo após o lançamento do primeiro satélite de recursos naturais, pelos Estados Unidos no ano de 1972, o Earth Satellite Remote Sensing, mais tarde batizado como Landsat-1.

Durante mais de duas décadas, pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE e de várias outras instituições do País vêm dedicando esforços, no sentido de desenvolver ou testar métodos para monitorar os recursos naturais renováveis e não renováveis do território brasileiro. Durante esse tempo, resultados de várias pesquisas, nas mais diversas áreas da ciência natural, demonstraram o grande potencial dos dados orbitais na solução de problemas ligados ao meio ambiente.

Diante disso, o Brasil, para não ficar alheio ao desenvolvimento do sensoriamento remoto em outros Países, estabeleceu um programa espacial denominado **MECB** (Missão Espacial Completa Brasileira) e, mais tarde, em parceria com a China, criou o Programa denominado **CBERS** (China-Brasil Earth Resources Satellite)

9.3.1 – Sensores Utilizados no Programa MECB

O Programa MECB foi criado com o objetivo de colocar em órbita seis satélites, sendo quatro equipados com sensores para coleta de dados meteorológicos e do meio ambiente, denominados SCD-1, SCD-2, SCD-2A e SCD-3 (Satélite de Coleta de Dados) e dois de sensoriamento remoto, SSR-1 e SSR-2, que serão colocados em órbita terrestre num futuro próximo, (INPE, 1995).

Os satélites SSR-1 e 2 terão órbitas circulares, equatoriais, girando em torno da Terra a uma altitude de 900 km. Estes satélites terão como carga útil um sistema sensor multiespectral, sendo três detetores operando na região do visível com resolução espacial que variará de 100 a 200 m e um detetor na região do infravermelho refletido, cuja resolução espacial variará de 300 a 400 m.

9.3.2 – Sensores Utilizados no Programa CBERS

O Programa CBERS é fruto da cooperação entre Brasil e China e teve início em julho de 1988. Os satélites CBERS são projetados para cobertura global e contêm câmeras para observação óptica e um sistema de coleta de dados ambientais. Na Figura 9.9 é mostrado um esquema da plataforma do CBERS e alguns de seus constituintes.

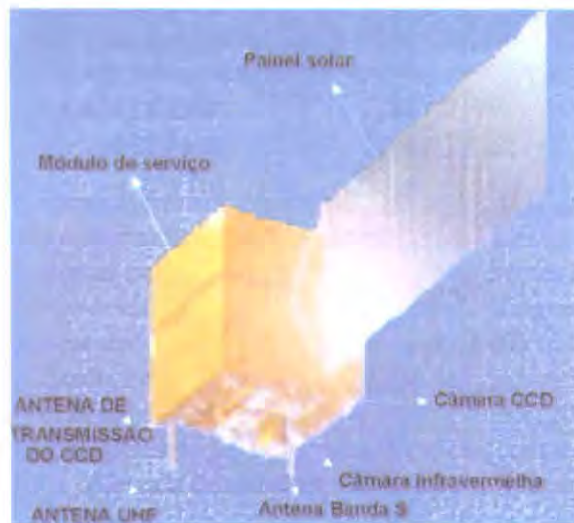


Fig. 9.9 – Esquema do satélite CBERS para mostrar alguns de seus componentes. FONTE: INPE (1995).

O satélite CBERS possui três tipos de sistemas sensores de coleta de dados de sensoriamento remoto para recursos naturais: o sensor CCD, o sensor IR-MSS e o sensor WFI.

9.3.2.1 – Sistema sensor CCD

O sensor CCD (Charge-Coupled Device) é uma câmera de alta resolução que fornece imagens de uma faixa de 113 km de largura no terreno, com uma resolução espacial de 19,5m x 19,5m (Tabela 9.7). Este sistema sensor tem capacidade de orientar seu campo de visada dentro de $\pm 32^\circ$, muito semelhante ao HRV do SPOT. Além disso, qualquer fenômeno detectado pelo sistema WFI pode ser focalizado pela câmera CCD, através do apropriado sistema de apontamento do seu campo de visada, dentro de no máximo três dias após ter sido

detectado. Operando normalmente, o sistema CCD gasta 26 dias para uma cobertura completa do globo terrestre.

Tabela 9.7 – Características do sensor CCD do satélite CBERS

BANDAS	FAIXAS ESPECTRAIS (nm)	REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPECIAL (m x m)
B1	450 – 520	Azul	19,5
B2	520 – 590	Verde	19,5
B3	630 – 690	Vermelho	19,5
B4	770 – 890	IVPróximo	19,5
B5 (PAN)	510 – 730	VIS-IVPróximo	19,5

9.3.2.2 - Sistema sensor IR-MSS

O sensor IR-MSS (InfraRed Multispectral Scanner Subsystem) é uma câmera de varredura que opera em quatro faixas espectrais do espectro eletromagnético desde o visível até o termal.

O IR-MSS coleta informações espectrais dos alvos da superfície terrestre de uma faixa no terreno de 120 km de largura, gastando também 26 dias para obter uma cobertura completa da Terra (Tabela 9.8)

Tabela 9.8 - Características do sensor IR-MSS do satélite CBERS

BANDAS	FAIXAS ESPECTRAIS (nm)	REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPECIAL (m x m)
B6	500 – 1100	VIS-IVPróximo	77,8
B7	1550 – 1750	IVMédio	77,8
B8	2080 – 2350	IVMédio	77,8
B9	10040 – 12050	IVTermal	77,8

9.3.2.3 - Sistema sensor WFI

O WFI (Wide Field Imager) é um imageador de largo campo de visada que imagea uma faixa no terreno de 890 km de largura. Com este sensor é possível obter uma cobertura completa do globo a cada 5 dias. O sensor opera em duas faixas espectrais do espectro eletromagnético, conforme é descrito na Tabela 9.9. Por problemas técnicos o WFI deixou de operar no satélite CBERS-1 pouco tempo depois do lançamento; entretanto, fará parte da carga útil do CBERS-2 a ser lançado no ano de 2001.

Tabela 9.9 – Características do sensor WFI do satélite CBERS

BANDAS	FAIXAS ESPECTRAIS (nm)	REGIÃO DO ESPECTRO	RESOLUÇÃO ESPECIAL (m x m)
B10	630 – 690	Vermelho	256
B11	770 – 890	IVPróximo	256

O satélite CBERS foi colocado em órbita da Terra a uma altitude de 778 km, possui uma órbita circular, síncrona com o sol, com um ângulo de inclinação de $98,504^\circ$ em relação ao plano equatorial. Na Figura 9.10 é mostrado um esquema das faixas de imageamento no terreno para cada um dos três sensores.

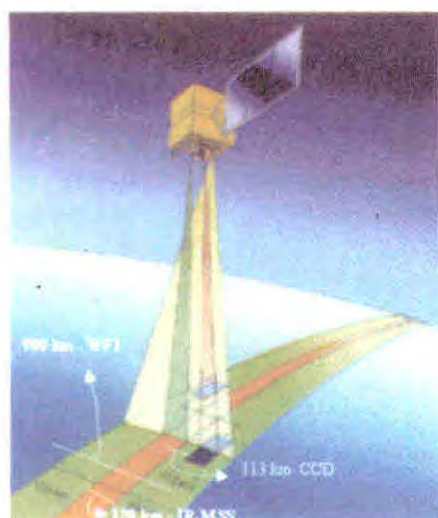


Fig.9.10 - Esquema do satélite CBERS para mostrar a largura das faixas de varredura dos três sistemas sensores. FONTE: INPE (1995).

9.4 Sistemas Sensores Ativos

O Radar (“**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging”) é um sistema sensor ativo que opera na faixa espectral de rádio ou de microondas. O princípio de funcionamento do radar consiste na emissão de pulso de microondas e registro do sinal de retorno. O registro da energia refletida, após a interação do sinal com os alvos da superfície terrestre, contém duas grandezas distintas: o tempo de retorno e a intensidade do sinal.

O tempo de retorno refere-se diretamente à distância entre o alvo e a fonte (antena) emissora. Este parâmetro foi e está sendo largamente utilizado para mensuração de distância e azimute em radares convencionais, por exemplo, na determinação e posicionamento de aeronaves em aeroportos e em espaços aéreos determinados.

Em sensoriamento remoto, a grandeza mais utilizada é a intensidade do sinal de retorno. Neste caso, ela está diretamente associada a um nível de cinza registrado na imagem, que por sua vez, é proporcional à intensidade do sinal recebido pela antena. A potência registrada pelo Radar é uma função complexa, sendo dependente de uma série de fatores tais como: tamanho do alvo, forma, orientação em relação ao radar, comprimento de onda, polarização, etc. Normalmente, define-se a energia refletida pelo alvo “iluminado”, na faixa de microondas, como **coeficiente de retroespalhamento**, em analogia ao fator de reflectância espectral bidirecional, correspondente à região do espectro óptico. O coeficiente de retroespalhamento é definido como:

$$\sigma = \sigma^{\circ} \cdot A = \gamma (A \cdot \sin\psi) \quad (9.1)$$

$$\sigma^{\circ} \text{ (dB)} = 10 \cdot \log \sigma^{\circ} (\text{m}^2/\text{m}^2) \quad (9.2)$$

onde:

γ = seção de choque de espalhamento por unidade de área projetada, sendo a área normal à direção de propagação pela qual a área é iluminada; σ = área efetiva do alvo que é interceptada e que redireciona a energia; σ° = seção de choque de espalhamento por unidade de área (coeficiente de retroespalhamento), adimensional e geralmente expresso em dB (decibéis); A = área iluminada e ψ = ângulo de depressão.

Na Figura 9.11 é mostrado um esquema de um sistema RADAR para ilustrar a influência do ângulo de depressão ψ .

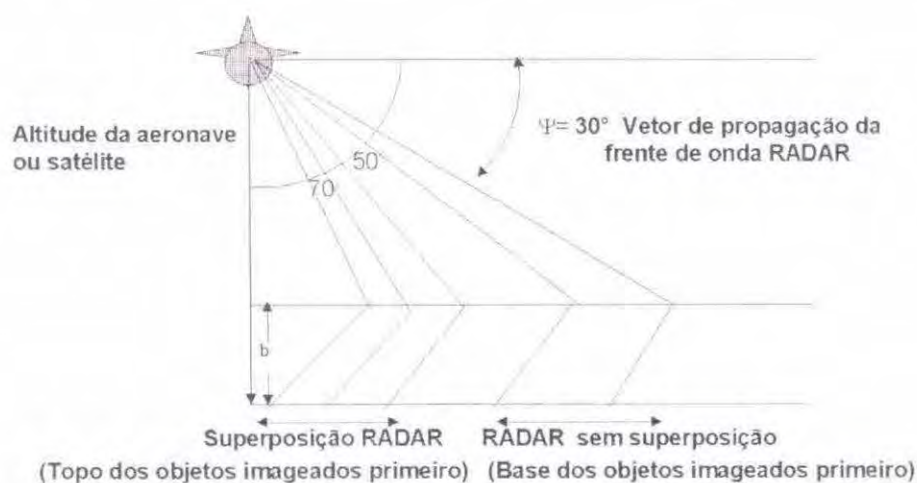


Fig. 9.11 – Influência do ângulo de depressão ψ , na cobertura RADAR.
 FONTE: adaptada de Lillesand e Kiefer (1987).

Uma das maiores dificuldades na preparação das imagens RADAR é a atenuação do ruído conhecido como “*speckle*”. Este ruído é causado pelo resultado da interação da radiação na faixa de microondas com os alvos da superfície terrestre, conforme é mostrado na Figura 9.12. Como a radiação na faixa de microondas pode ser representada por uma grandeza complexa, isto é, um módulo e um ângulo de fase, as reflexões, absorções e o retroespalhamento, podem anular o módulo do vetor retorno ou o ângulo de fase em 90° , deixando o sensor de registrar qualquer retorno do sinal para os pixels adjacentes, o que não acontece com as imagens ópticas (imagens obtidas pelos sensores passivos).



Fig. 9.12 – Interação da radiação microondas com três tipos de superfícies.
FONTE: adaptada de Ahern (1994)

Neste efeito “*speckle*” é possível encontrar-se na imagem, pixels com níveis de cinza zero (preto) ao lado de pixels com alto nível de cinza, ambos referentes ao mesmo alvo.

Como a iluminação ativa do Radar é inclinada segundo um ângulo de depressão, um outro problema da imagem Radar surge em função da geometria de visada: “*slant range*”, ou resolução da imagem no sentido perpendicular à direção de vôo da plataforma (aeronave ou satélite) e o “*ground range*” ou resolução da imagem na direção de deslocamento da plataforma. Estas duas resoluções causam um efeito de deformação geométrica diferente das imagens tomadas na direção nadir. Uma imagem de visada no nadir pode ser cônica, se for tomada por câmeras fotográficas convencionais. Neste caso, a deformação geométrica se faz do centro para as bordas da imagem.

Nas imagens Radar, as correções geométricas são mais complexas. Segundo Lillesand, et al. (1989), o efeito de retorno antecipado do sinal de microonda de um alvo com certa altura, em relação à fonte emissora (antena), provoca um efeito chamado de deslocamento do relevo, aparecendo o topo da imagem antes que sua base na direção de “*slant range*”. Quanto mais afastado estiver o alvo, maior será o afastamento do relevo (“*foreshortening*”). Quanto mais próximo estiver o alvo, da direção de vôo da plataforma, maior será a sobreposição de sinais recebidos, menor sombra e, portanto, menor deslocamento do relevo, conforme pode ser visto na Figura 9.13.

A radiação na faixa de microondas é muito absorvida pela água, entretanto, isto irá depender da faixa de comprimentos de onda em que opera o Radar (Tabela 9.10). A radiação pode penetrar mais ou menos, nas camadas superficiais dos alvos da superfície terrestre, excetuando-se, como foi mencionado, na água líquida provocando grande absorção e reflexão especular, fornecendo um retorno “*backscatter*” baixíssimo, ou simplesmente não fornecendo retorno algum (nível de cinza zero). Quanto maior for o comprimento de onda, dentro da faixa de microondas, maior será a penetração na superfície, incluindo solos e dosséis vegetais. Com isso, o imageamento em áreas florestadas, numa banda de Radar de grande comprimento de onda (banda L, por exemplo), forneceria maiores informações sobre a superfície de fundo (extrato inferior) do que uma banda Radar de comprimento de onda menor (banda X, por exemplo).

A banda P, de maior comprimento de onda e, portanto, de maior penetração na superfície terrestre, não se presta ao sensoriamento remoto orbital devido à forte interferência (UHF e VHF), que atua como ruído de fase, no pós-processamento do dado bruto (“*raw-data*”).

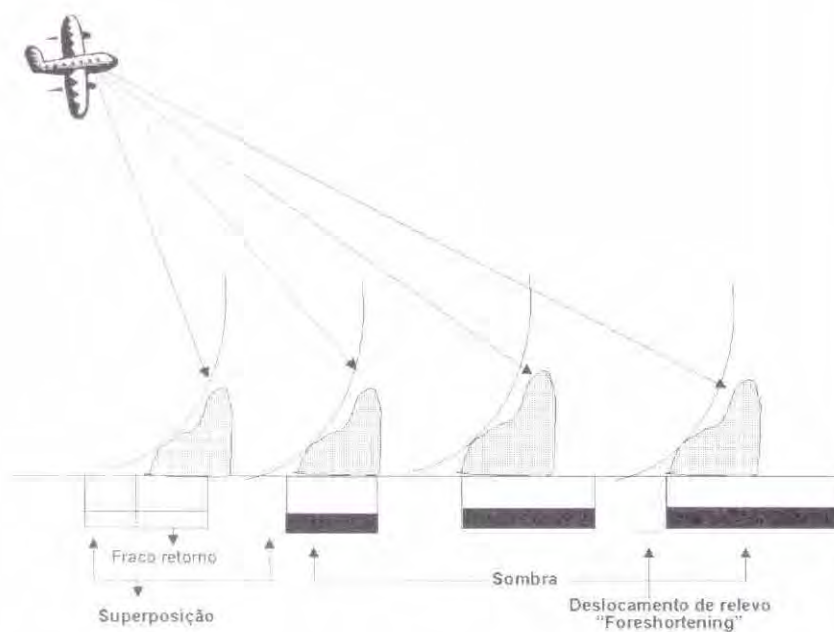


Fig. 9.13 – Efeito do deslocamento do relevo em função do "Slant Range"
 FONTE: adaptada de Lillesand et al. (1989)

Tabela 9.10 – Designações das bandas de RADAR

BANDA	COMPRIMENTO DE ONDA (cm)	FREQÜÊNCIA MHz	UTILIZAÇÃO MAIS COMUM
Ka	0,75 – 1,10	40000 – 26500	Comunicações
K	1,10 – 1,67	26500 – 18000	Comunicações
Ku	1,67 – 2,40	18000 – 12500	Comunicações e RADARES de espaço aéreo
X	2,40 – 3,75	12500 – 8000	RADARES de espaço aéreo e Sensoriamento remoto
C	3,75 – 7,50	8000 – 4000	Sensoriamento remoto
S	7,50 – 15	4000 – 2000	Transponder de satélites de comunicações
L	15 – 30	2000 – 1000	Sensoriamento remoto; VLBI*; GPS**
P	30 – 100	1000 – 300	Sensoriamento remoto

* Very Large Baseline Interferometry ** Global Position System

Como representantes dos sistemas de sensores ativos orbitais (Sistema de Radar) temos o RADARSAT-1, O JERS-1 e o ERS-1.

O RADARSAT, conforme veremos a seguir, é um satélite canadense, o JERS-1 é japonês e o ERS-1 pertence à agência espacial européia. Os três sistemas de radares são semelhantes na maneira

de operação, exceto o JERS-1 que opera na banda X, enquanto que os outros dois sistemas operam na banda-C. Neste capítulo será discutido, em maiores detalhes, o RADARSAT, uma vez que a disponibilidade de dados no Brasil, provenientes deste satélite é maior do que a dos outros dois.

O projeto RADARSAT foi criado no ano de 1989, pela Agência Espacial Canadense. Em novembro de 1995 foi lançado o primeiro satélite, o RADARSAT -1. O sistema conta com uma antena versátil, que produz imagens da terra sob 35 modos diferentes, variando o campo de abrangência da antena. A antena SAR (*Synthetic Aperture Radar*) utiliza uma frequência simples (Banda C). A Figura 9.14 e a Tabela 9.11 contêm informações sobre o satélite e sua carga útil, e na Figura 9.15 podem ser vistos detalhes dos diferentes tipos de imageamento do satélite.

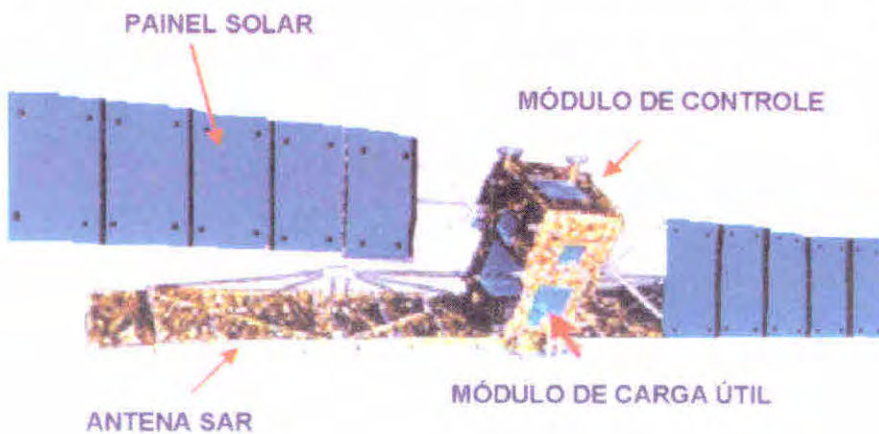


Fig.9.14 – RADARSAT e seus principais constituintes
FONTE: http://www.rsi.ca/info/press/NR_pgs_1sat7.pdf

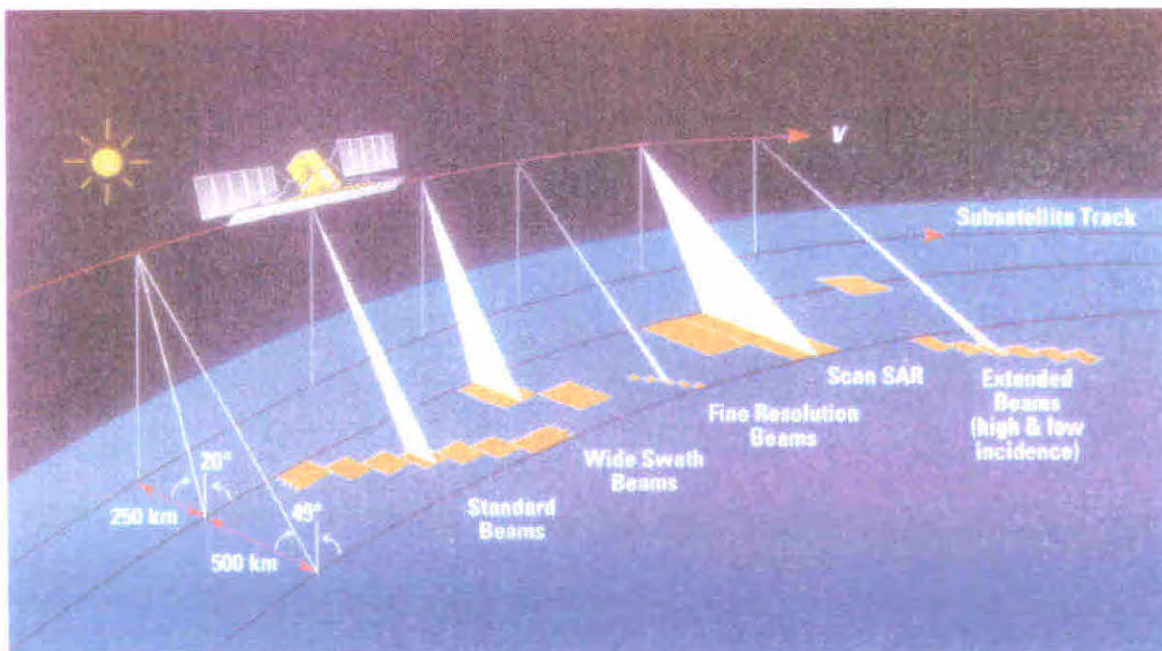


Fig. 9.15 – Detalhes do sistema de imageamento do RADARSAT- SAR
FONTE: http://www.rsi.ca/info/press/NR_pgs_1sat7.pdf

Tabela 9.11 – Características da carga útil do satélite RADARSAT.

SENSOR	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA	RESOLUÇÃO (m x m)	FAIXA DE IMAGEAMENTO (km)
Standard	20 – 49	28 x 25	100
Banda larga (Wide Swath)	20 – 39	28 x 35	150
Resolução fina	37 – 48	10 x 9	45
Cobertura estendida	49 – 59	20 x 20	75
ScanSAR (estreita)	20 – 39 31 – 46	interrompido	–
ScanSAR (wide)	20 – 49	100 x 100	500

A resolução temporal do RADARSAT é de 24 dias. O satélite apresenta uma órbita polar síncrona com o sol.

Na Figura 9.16 está contida uma imagem obtida pelo RADARSAT – I sobre a serra dos Carajás no Pará.

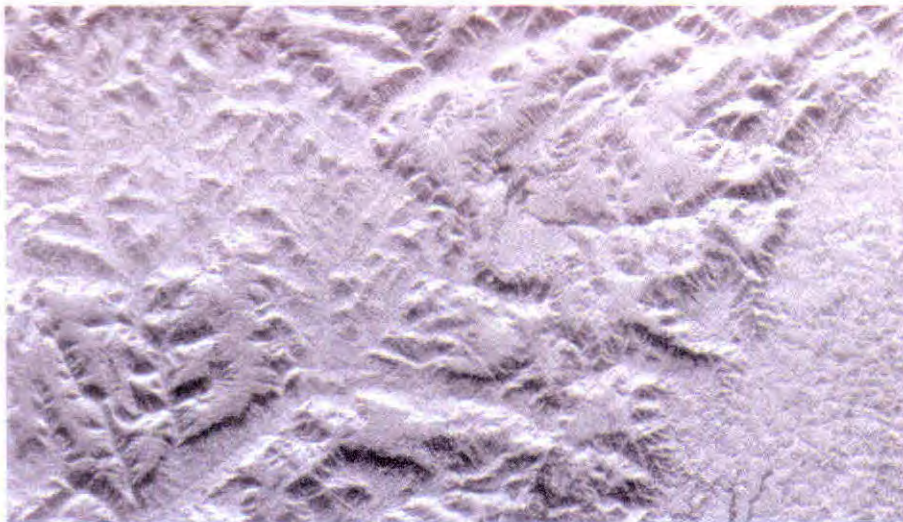


Fig. 9.16 – Imagem da região da serra dos Carajás (PA) obtida pelo RADARSAT-I FONTE: INPE (1998).

Na imagem da Figura 9.16 é possível perceber o efeito do relevo, onde a parte exposta à radiação aparece em tom de cinza mais claro, quando comparado ao tom de cinza escuro do lado oposto à direção da radiação emitida pelo radar.

Capítulo 10

Metodologia de análise de dados coletados por sensores em nível do solo

No capítulo 6 vimos que as informações espectrais de alvos da superfície terrestre são obtidas por sistemas sensores, em três níveis de coleta de dados: terrestre, suborbital e orbital.

Independente do nível de coleta dos dados, os métodos utilizados para extrair essas informações podem ser agrupados em três categorias: interpretação visual, tratamento digital e análises estatísticas de dados espectrais, quando estes estão em forma de tabelas ou transformados em algum tipo de índice.

Em geral, os dados espectrais coletados por sensores não-fotográficos, em nível do solo, são expressos em forma numérica, como é o caso de medidas do índice de área foliar (IAF), ou gráfica, ou ainda transformados em índices, no caso de dados radiométricos. Para esses tipos de dados, a análise é feita empregando-se critérios comparativos que podem ser visual e métodos estatísticos, podem ser baseados na média, na análise de variância, no teste de comparação de médias (teste "t", Tukey, Duncan, etc.) ou uma regressão, tendo em vista que, na maioria dos casos, os dados coletados estão associados a um delineamento experimental.

No caso de medidas da reflectância da vegetação, utilizando espectrorradiômetros, geralmente empregam-se duas abordagens de análise dos dados coletados. A primeira consiste numa análise visual das curvas de reflectância, para observar o comportamento espectral dos alvos contidos na área dentro do ângulo de visada do sensor, ao longo da faixa de comprimento de onda que opera o equipamento, conforme é mostrado na Figura 10.1. Entretanto, a análise visual, por si só, não tem grande utilidade do ponto de vista experimental, todavia, serve de base para se tomar uma decisão sobre aplicar, ou não, testes estatísticos nos dados observados. A segunda abordagem, consiste em transformar os dados espectrais em outras unidades como, por exemplo, os índices de vegetação que podem ser utilizados, ainda, para estimar certos parâmetros da radiação solar, como a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, o uso eficiente da radiação para produção de fitomassa e/ou grão, etc.

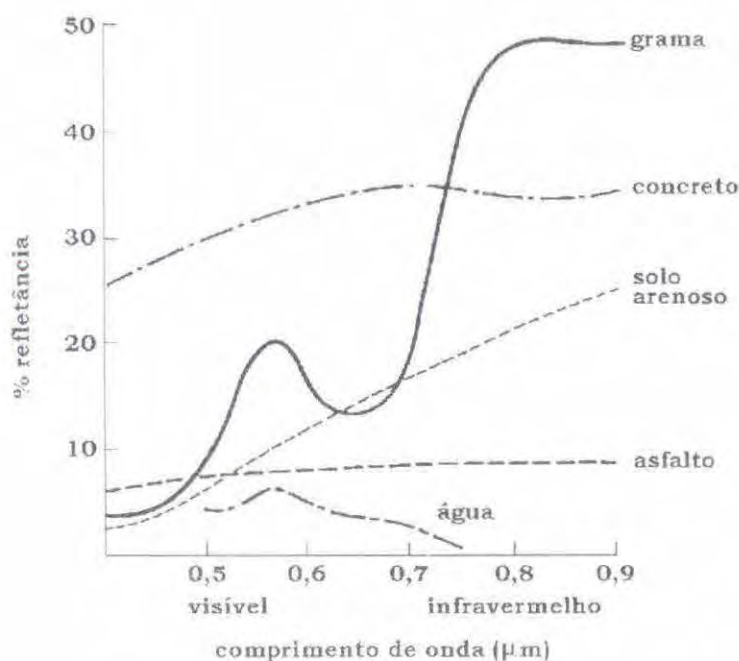


Fig. 10.1 – Curvas de refletância obtidas para diferentes tipos de alvos contidos dentro do ângulo de visão do sensor.

Conforme é mostrado na Figura 10.1, cada alvo apresenta comportamento espectral diferente, para uma mesma condição ambiental. Observa-se que a água é o alvo que apresenta a mais baixa refletância e absorve toda a radiação acima de 750 nm. O asfalto apresenta um comportamento espectral quase uniforme e paralelo ao longo do eixo X, não ultrapassando 10% no valor da refletância. Observando ainda a Figura 10.1 nota-se que o alvo que mais reflete a radiação no infravermelho próximo é a grama, que reflete cerca de 50% da radiação, nesta faixa do espectro eletromagnético. Esta análise visual, embora sem nenhuma confiabilidade estatística, é útil para uma tomada de decisão, ou seja, é um indicativo de que devemos prosseguir o processo de análise do comportamento espectral desses alvos. Esses dados podem ainda ser transformados num índice de vegetação qualquer, por exemplo, o NDVI ou mesmo analisar os valores da refletância nas faixas espectrais do vermelho (600 a 700 nm) e do infravermelho próximo (700 a 900 nm). A continuidade das análises após o processamento dos dados espectrais pode ser, por exemplo, através de procedimentos estatísticos, como comparação de médias, etc.

10.1 Índices de Vegetação e Determinação a Partir de Dados Radiométricos

Com a evolução do sensoriamento remoto, foram colocados em órbita satélites com sistemas sensores capazes de obter informações espectrais dos alvos da superfície da Terra, em várias bandas do espectro eletromagnético, como é o caso do sensor TM do Landsat, discutido anteriormente. Este aumento do número de bandas espectrais aumentou consideravelmente o número de dados sobre os alvos a serem analisados o que, de certa forma, aumentou também o trabalho de análise desses dados.

Os índices de vegetação foram criados, entre outras coisas, para tentar diminuir o trabalho de análise de dados orbitais, através de uma maximização de informações espectrais da vegetação no menor número de bandas de operação dos sensores. Eles foram criados no intuito de ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre (realçar o contraste espectral existente entre a vegetação e o solo). Assim sendo, estes índices de vegetação podem ser obtidos tanto de dados coletados por satélites como de dados obtidos por equipamentos próximos ao alvo de interesse, como é o caso dos espectrorradiômetros.

Na opinião de vários pesquisadores, dentre eles podemos citar Chen et al. (1986), Vygodskaya et al. (1989) e Wiegand et al. (1991), o emprego de índices de vegetação, para caracterizar e quantificar um determinado parâmetro biofísico de culturas agrícolas, tem duas grandes vantagens: a) permite reduzir a dimensão das informações multispectrais, através de um simples número, além de minimizar o impacto das condições de iluminação e visada; e b) fornece um número altamente correlacionado aos parâmetros agrônômicos. Além disso, Pinter Jr. et al. (1985) comentam que o estudo do comportamento espectral de alvos agrícolas, através da razão entre bandas espectrais (índices de vegetação), é mais indicado do que o emprego separado de dados espectrais em cada banda do sensor porque controla os erros introduzidos nas estimativas da radiancia pela resposta lambertiana dos alvos agrícolas. Os índices de vegetação têm sido empregados com grande sucesso nos estudos para caracterizar parâmetros biofísicos da vegetação, tais como: índice de área foliar verde (Holben et al., 1980; Asrar et al., 1984; Hatfield et al., 1985; Clevers, 1989), fitomassa (Tucker, 1979; Green, 1987; Gallo et al., 1985; Prince, 1991), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Wiegand et al., 1974; Asrar et al., 1984; Hatfield et al., 1984; Seller, 1985) e produtividade (Asrar et al., 1985).

Os índices de vegetação resultam de transformações lineares da reflectância, obtida em duas ou mais bandas espectrais do espectro eletromagnético, através de soma, de razão entre bandas, da diferença, ou de qualquer outra combinação (Wiegand et al., 1991).

De acordo com Baret e Guyot (1991), os índices de vegetação existentes podem ser agrupados em duas grandes classes: índices na forma de razão, como exemplo, “*Ration Vegetation Index*” (RVI); “*Normalized Difference Vegetation Index*” (NDVI); “*Soil Adjusted Vegetation Index*” (SAVI) e índices caracterizados pela distância ortogonal [exemplo, “*Perpendicular Vegetation Index*” (PVI); “*Weighted Difference Vegetation Index*” (WDVI); “*Greenness Vegetation Index*” (GVI)], cujas expressões matemáticas estão contidas na Tabela 10.1.

ÍNDICE	REFERÊNCIA	DEFINIÇÃO *
RVI	Person e Miller (1972)	IVP/V
NDVI	Deering et al. (1975)	$IVP - V / IVP + V$
SAVI	Huete (1988)	$(IVP - V) / (IVP + V + L) * (1 + L)$
TSAVI	Baret et al. (1989)	$a * (IVP - aV - b) /$ $[a IVP + r - ab + X * (1 + a^2)]$.
PVI	Richardson e Wiegand (1977)	$(IVP - aV - b) / \sqrt{1 + a^2}$
WDVI	Baret e Guyot (1991)	$IVP - aV$

Tabela 10.1 – Índices de vegetação comumente utilizados

* *V*, *IVP* refere-se a reflectância na faixa espectral do visível e do infravermelho próximo, respectivamente, e *a* e *b* referem-se a parâmetros da linha do solo, *L* é uma constante para minimizar a influência do solo.

Na literatura são encontrados mais de 50 índices de vegetação, entretanto, os dois índices de vegetação mais comumente usados são: Razão Simples (RVI) e o Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI).

Do ponto de vista matemático, esses dois índices apresentam equivalência funcional, ou seja, contêm o mesmo tipo de informações sobre parâmetros biofísicos das culturas (Jackson e Huete, 1991). No entanto, conforme comentam os autores, o NDVI é mais sensível à vegetação esparsa do que o RVI.

Um dos espectrorradiômetros bastante utilizado para obter o fator de reflectância, é o SPCTRON SE-590. Para o cálculo dos índices de vegetação RVI e NDVI, por exemplo, o procedimento segue a seguinte rotina: a) uma vez feitas as medidas de reflectância sobre a área de interesse, estes dados são transferidos para o computador onde é feita a calibração, a intercalibração e finalmente é obtido o fator de reflectância.

Para obter os valores do fator de reflectância, correspondentes às regiões do vermelho e no infravermelho próximo (bandas TM3 e TM4 do Landsat), existem várias maneiras e métodos. No programa ESPECTRO, desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, existe uma sub-rotina que possibilita obter estes valores e de outras faixas do espectro eletromagnético, correspondentes às bandas do sensor MSS e do HRV do SPOT.

Na Tabelas 10.2 são mostrados, por exemplo, alguns valores do fator de reflectância extraídos de medidas feitas sobre dosséis de trigo, submetidos a diferentes níveis de adubação nitrogenada e de irrigação e, na Tabela 10.3, estão contidos valores do fator de reflectância (derivados da Tabela 10.2) para as bandas espectrais correspondentes a quatro faixas espectrais em que operam os sensores TM, e três para o sensor MSS do Landsat.

É importante salientar que essa tabela é representa apenas uma pequena parte de uma medida radiométrica. Na Tabela esses dados são fornecidos para comprimentos de ondas que vai de 350 nm até 1100 nm, com intervalo de comprimento de onda de aproximadamente 10 nm.

Com os valores do fator de reflectância contidos na Tabela 10.3, correspondentes às bandas TM3 (região do vermelho) e TM4 (região do infravermelho próximo), são calculados os índices de vegetação RVI e NDVI, para cada uma das parcelas do experimento, utilizando as equações expressas na Tabela 10.1. Vejamos, por exemplo, o procedimento para calcular esses dois índices (RVI e NDVI) para a parcela 1.

COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	VALORES DO FATOR DE REFLECTÂNCIA OBTIDOS EM CADA UMA DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS *					
	1	2	3	4	5	N
486.10	0.02912	0.02973	0.02654	0.02825	0.02801
488.90	0.02942	0.02996	0.02678	0.02854	0.02828
491.60	0.02988	0.03049	0.02723	0.02878	0.02868
494.40	0.03025	0.03092	0.02740	0.02904	0.02907
497.20	0.03065	0.03151	0.02781	0.02949	0.02952
500.00	0.03122	0.03207	0.02831	0.02979	0.02997

* Na horizontal lê-se números de parcelas do experimento, numeradas segundo o tratamento aplicado.

Tabela 10.2 – Valores parciais do fator de reflectância em função do comprimento de onda e da parcela experimental.

Parcela	Fator de Reflectância para algumas bandas do TM e do MSS do LANDSAT						
	TM1	TM2	TM3	TM4	MSS1	MSS2	MSS3
1	0.055	0.104	0.121	0.369	0.096	0.122	0.313
2	0.050	0.095	0.102	0.385	0.088	0.103	0.319
3	0.039	0.075	0.082	0.299	0.069	0.083	0.249
4	0.033	0.063	0.069	0.241	0.058	0.070	0.203
5	0.028	0.050	0.053	0.187	0.046	0.054	0.157

Tabela 10.3 – Valores da reflectância correspondente às bandas TM1, TM2, TM3, TM4, MSS1, MSS2, MSS3 do satélite Landsat, obtidos por parcela experimental

$$RVI_1 = \frac{0,369}{0,121} = 3,05$$

$$NDVI_1 = \frac{(0,369 - 0,121)}{(0,369 + 0,121)} = 0,51$$

Os resultados obtidos para os dois índices de vegetação ($RVI = 3,050$ e $NDVI = 0,506$) são números totalmente diferentes, devido ao emprego de equações diferentes. Entretanto, foram obtidos na mesma área amostral e da mesma medida radiométrica. Isto demonstra que a interpretação numérica é diferente para cada tipo de índice de vegetação considerado. Assim, certamente acontecerá para outros índices de vegetação existentes na literatura. O importante é que devemos ter o conhecimento do índice e da aplicabilidade, antes de optar por um ou outro índice.

Na Tabela 10.4 estão contidos os valores de oito índices de vegetação, Razão Simples (RVI) e Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI), calculados a partir de medidas radiométricas

PARCELA	RS	NDVI
1	3.05	0.51
2	3.77	0.58
3	3.64	0.57
4	3.49	0.55
5	3.52	0.56
6	3.97	0.59
7	4.72	0.65
8	4.09	0.61

feitas sobre a cultura do trigo.

Tabela 10.4 – Valores dos índices de vegetação RVI e NDVI obtidos a partir da Tabela 10.3.

Assim como as curvas contidas na Figura 10.1, mostram que há uma diferença no comportamento espectral das duas cultivares. Os valores dos índices RVI e NDVI, contidos na Tabela 10.4 indicam que há alguma diferença espectral entre as parcelas de 1 a 8, pelo menos em termos de valores numéricos. Sobre estes valores são aplicados testes estatísticos, conforme comentado nos parágrafos anteriores.

Numa análise sem rigor estatístico, poderíamos dizer que as parcelas 6, 7 e 8 são as que apresentam maiores quantidades de fitomassa (maiores valores dos índices) e que existe uma correlação entre os valores dos dois índices.

10.2 Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pelo Dossel de Vegetação e Estimativa através de Dados Radiométricos

Outra aplicabilidade dos dados obtidos pela radiometria de campo diz respeito à estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA) pelo dossel de vegetação.

O conhecimento da RFAA, com relação ao melhoramento de plantas, pode ser um parâmetro muito importante, uma vez que esta variável está intimamente relacionada à produção de fitomassa ou grão. Como se sabe, entre os fatores ambientais que influenciam o crescimento das plantas terrestres, a radiação solar tem um relevante destaque por ser a única fonte de energia para o processo fotossintético, conforme foi discutido no capítulo 4. Por essa razão, o maior uso da radiação pela planta implica numa maior produção de fitomassa ou grão. Assim, a RFAA pode ser utilizada como um parâmetro na seleção de plantas por ser um processo quantitativo.

Para o cálculo da RFAA, basicamente, existem duas linhas de pesquisas na área do sensoriamento remoto. Na primeira, a RFAA é medida através de equipamentos que registram somente a radiação solar na faixa espectral entre 400 nm e 700 nm (Hips, 1983; Gallo et al., 1985; Daughtry et al., 1992; Goward e Huemmrich, 1992). Como exemplo destes equipamentos pode-se citar o LAI 190SA, discutido no capítulo 7. Na segunda linha de pesquisa, RFAA é estimada através de índices de vegetação, que por sua vez são obtidos de medidas do fator de reflectância nas bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo (Asrar et al., 1984/85; Choudhury, 1987; Baret et al., 1989; Leblon et al., 1991; Price, 1992; Goward e Huemmrich, 1992).

No tocante à primeira linha de pesquisa é necessário que se façam quatro medidas relacionadas com a radiação solar para determinar a RFAA, ou seja, duas medidas acima do dossel da cultura e duas abaixo, conforme foi discutido no item 7.4.2 do Capítulo 7.

O fato de se ter que fazer duas medidas abaixo do dossel da cultura torna impraticável a utilização deste procedimento para grandes áreas agrícolas, pois tornaria o processo muito oneroso e demorado. Talvez tenha sido este o motivo que levou a busca de métodos alternativos, ou seja, estimar a RFAA através de índices de vegetação como veremos a seguir.

A idéia de se usar os índices de vegetação, mais especificamente o NDVI, para estimar a RFAA, surgiu com os estudos sobre a correlação existente entre estas duas variáveis. Dentre estes estudos, podemos citar os trabalhos teóricos realizados por Kumar e Monteith (1981) e Asrar et al. (1984). Essa correlação foi observada na prática para vários dosséis agrícolas (Daughtry et al., 1983; Hatfield et al., 1984; Gallo et al., 1985) e em pastagem (Asrar et al., 1986).

10.2.1 – Etapas Empregadas para Estimativa do RFAA através do NDVI

A estimativa da RFAA envolve alguns passos metodológicos, conforme será descrito a seguir:

PRIMEIRA ETAPA: Cálculo da fração (f_A) da RFAA através do emprego do NDVI.

A fração (f_A) expressa a quantidade da radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida num determinado intervalo de tempo (instantâneo), para uma medida feita num determinado dia durante o ciclo da cultura. É importante salientar que não existe uma metodologia generalizada para estimar a fração (f_A), através do NDVI, para todas as culturas agrícolas. O que existe, até o presente momento, são equações empíricas que estimam (f_A) para as cultura do trigo, milho e soja, conforme as seguintes expressões:

1) Cultura do trigo

$$f_A = -0,109 + 1,253 \text{ NDVI} \quad (\text{Asrar et al., 1984}) \quad (10.1)$$

$$R^2 = 0,965$$

2) Milho e Soja

$$f_A = -0,205 + 1,254 \text{ NDVI} \quad \text{Daughtry et al. (1992)} \quad (10.2)$$

$$R^2 = 0,96$$

Como exemplo, empregou-se na Eq. 10.1, os valores do NDVI da Tabela 10.4 para o cálculo de (f_A) para as 8 parcelas de trigo, cujos resultados são mostrados na Tabela 10.5.

PARCELA	NDVI	valor de (f_A) Wm ²
1	0.51	0.53003
2	0.58	0.61774
3	0.57	0.60521
4	0.55	0.58015
5	0.56	0.59268
6	0.59	0.63027
7	0.65	0.70545
8	0.61	0.65533

Tabela 10.5 – Valores da fração (f_A), calculados a partir dos dados da Tabela 10.4

SEGUNDA ETAPA: Determinação da radiação global incidente diária

A radiação global incidente (R_g) diária pode ser determinada através de equipamentos instalados nos postos meteorológicos, ou estimada através de equações, como exemplo, a equação de Angstrom, conforme relata Tubelis e Nascimento (1980):

$$R_g = R_0 (a + b n/N) \quad (10.3)$$

onde:

R_g = radiação solar global (cal cm⁻² dia⁻¹),

R_0 = radiação solar em uma superfície horizontal no topo da atmosfera (cal.cm⁻² dia⁻¹) valores tabelados,

n = insolação diária

N = número diário possível de horas de brilho de sol na área de interesse

n/N = razão de insolação.

Os valores de n e N são obtidos nos postos meteorológicos.

TERCEIRA ETAPA: Estimativa da RFA a partir de R_g e f_A

Szeicz (1974), através de cálculos teóricos e de medidas experimentais da radiação solar, concluiu que a RFA incidente, corresponde a $0,5 \pm 0,03$ da R_g que incide diariamente, independente das condições atmosféricas. Entretanto, estudos feitos por Assunção (1994), na região de Piracicaba, permitiram ao autor determinar três equações para o cálculo da RFA. No cálculo da RFA incidente, o autor leva em consideração a razão de insolação (n/N):

1) Dias em que $n/N \leq 0,1$

$$RFA = 0,47R_g \quad (R^2 = 0,99) \quad (10.4)$$

2) Dias em que $0,1 \leq n/N \leq 0,9$

$$RFA = 0,429 R_g \quad (R^2 = 0,965) \quad (10.5)$$

3) Dias em que $n/N \geq 0,90$

$$RFA = 0,496 R_g \quad (R^2 = 0,99) \quad (10.6)$$

Para comparar os valores da RFA incidente, obtidos através da proposição de Szeicz (1974) e de Assunção (1994), tomemos como exemplo a radiação global do dia 12 de julho de 1995, que foi de $291 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Neste dia, a insolação diária foi de 8,4 horas, e o número máximo de horas de brilho de sol foi de 10,75 horas.

RFA segundo Szeicz (1974):

$$RFA = 0,5 \cdot 291 = 145,5 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

RFA segundo Assunção (1994):

$$n/N = 8,4/10,75 = 0,781$$

Como $0,1 \leq n/N \leq 0,9$ e usando a Eq.10.5 temos:

$$RFA = 0,429 \times 291 = 124,84 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

Por esses dois procedimentos nota-se que a RFA incidente estimada, segundo Szeicz foi superior à determinada pelo modelo de Assunção, ou seja foi superestimada em 20,66 cal.

Uma vez determinada a RFA, a próxima etapa é estimar a RFAA. Para tal, tomamos como exemplo o valor da RFA de $97,57 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, e com um valor de f_A de 0,53003 temos:

$$RFAA = 0,53003 \times 124,84 = 66,169 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

Para obter a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada, desde a emergência até a maturação fisiológica, basta somar a RFAA diária durante o período considerado.

10.3 Eficiência do Uso da Radiação

A eficiência do uso da radiação ou eficiência fotoquímica (ϵ) é a razão da matéria seca produzida, geralmente em gramas (g), pela radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (RFAAac), ou seja, a eficiência do uso da radiação expressa o quanto de matéria seca que é produzida por unidade de energia RFA que foi absorvida pela vegetação, da emergência até a maturação fisiológica. Geralmente é expressa em g MJ^{-1} (Gallo et al., 1993).

A eficiência do uso da radiação para produção de grãos é dado por:

$$\epsilon_G = \frac{\text{Massa do Grão}}{\text{RFAAac}} \text{ g MJ}^{-1} \quad (10.7)$$

A eficiência do uso da radiação para produção de fitomassa é dados por:

$$\epsilon_F = \frac{\text{Fitomassa (g)}}{\text{RFAAac}} \text{ g MJ}^{-1} \quad (10.8)$$

A eficiência fotossintética do aproveitamento da energia solar não é a mesma para todos os dosséis de plantas. De modo geral, esta eficiência para as culturas agrícolas é baixa, não atingindo 1%. Em condições ótimas registram-se eficiências de 3 a 4% para as plantas C_3 , e de 5 a 6% para as C_4 (Machado, 1985). Por essa razão, é importante conhecer o valor de ϵ para cada tipo de cultura e sua variação em relação aos fatores ambientais, culturais e de manejo, pois ela é uma das variáveis de muitos modelos de crescimento e produção de culturas agrícolas, que levam em consideração a radiação incidente total (R_g), a RFA incidente, a fração (f_A) da RFA absorvida pelo dossel (f_A) e a eficiência do uso da radiação (ϵ) num intervalo de tempo (T). Monteith (1972) mostrou que a relação entre a produção de fitomassa seca total e a PAR absorvida pelo dossel de plantas pode ser escrita como:

$$M = \epsilon \int f_A \cdot \text{RFA} \cdot R_g \cdot dt \quad (10.9)$$

onde: M é fitomassa seca total produzida, geralmente considerada acima do solo (g m^{-2}), e é a eficiência do uso da radiação ou eficiência fotoquímica (g MJ^{-1}); f_A é a fração RFAA, em MJ m^{-2} , RFA é a energia fotossinteticamente ativa incidente e R_g é a radiação solar total (global) incidente, em MJ m^{-2} .

Isolando e na Equação 10.9 tem-se:

$$\epsilon = \frac{M}{\int f_A \cdot \text{RFA} \cdot R_g \cdot dt} \quad \text{onde, } \int f_A \cdot \text{RFA} \cdot R_g \cdot dt = \text{RFAAac} \quad (10.10)$$

Os dois exemplos mostrados acima, dão uma boa idéia do emprego do sensoriamento remoto em nível do solo, principalmente, o uso do espectrorradiômetro.

Capítulo 11

Metodologia de análise de dados coletados por sensores em nível suborbital

Conforme foi discutido no capítulo 8, entre os sensores aerotransportados as câmeras fotográficas (câmeras métricas) são as mais importantes do ponto de vista operacional por ser de uso consagrado. A utilização de fotografias aéreas para estudos voltados ao ambiente teve início bem antes do surgimento do sensoriamento remoto orbital. Mesmo após a consolidação dos dados orbitais, elas continuam sendo muito utilizadas para estudos que exigem maiores detalhes de reconhecimento dos alvos de ocupação do solo ou quando o fator tempo não é uma variável que interfere nos resultados. Os motivos que levam as pessoas a utilizarem fotografias aéreas nas soluções de problemas voltados ao ambiente são vários. Entretanto, dois deles devem ser destacados, ou seja, a alta resolução radiométrica (que permite identificar alvos em nível detalhados) e o fato de ser obtidas na faixa do espectro eletromagnético que vai de 300 nm a 900 nm que é uma região do espectro muito importante do ponto de vista de sensoriamento remoto orbital.

É preciso deixar claro que, com a evolução da informática, outros equipamentos de coleta de dados aerotransportados têm surgido no mercado, como. Dentre eles merece destaque o sistema de videografia.

Dado a importância dessas duas fontes de dados, para fornecer informações de alvos na superfície terrestre, neste capítulo a ênfase foi dada a metodologia de tratamento de fotografias aéreas e dados de videografia.

11.1 Metodologia de Interpretação de Fotografias Aéreas

As fotografias aéreas têm uma aplicabilidade muito diversificada. Podem ser usadas no planejamento de áreas urbanas, no mapeamento de solos, na cartografia, na identificação e mapeamento de uso do solo, etc. Para cada objetivo há critérios que devem ser obedecidos. Por exemplo, na cartografia ou em ações judiciais, antes de se fazer a interpretação das feições existentes na área fotografada, as fotos devem ser restituídas, para torná-las uniformes quanto à escala preestabelecida para o aerolevanteamento. Por outro lado, se as fotografias aéreas têm como finalidade fornecer informações de uso do solo, para auxiliar o analista no reconhecimento de padrões espectrais de alvos nas imagens de satélites, a preocupação de escala passa a ser secundária. Neste caso, o importante é a identificação do tipo de alvo na área. Evidentemente que se deve ter certos cuidados quanto à escala de trabalho. Em síntese, pode-se dizer que o rigor na precisão dos resultados obtidos da interpretação

visual de fotografias aéreas depende dos objetivos aos quais eles são destinados.

Apesar das fotografias aéreas serem de aplicabilidade diversificada, o custo e o tempo gasto para obter um determinado tipo de informação do uso do solo é bastante alto, quando comparado com os dados de satélites. Entretanto, ainda hoje as fotografias aéreas são muito utilizadas para realizar planejamento urbano e cadastramento de imóveis rurais, devido à alta resolução espacial e a qualidade das informações nelas contidas.

Na Agricultura por exemplo, as fotografias aéreas podem ser utilizadas para os seguintes objetivos: a) identificação e mapeamento de culturas agrícolas; b) avaliação de áreas cultivadas; c) detecção de áreas afetadas por pragas e doenças; d) verdade terrestre para auxiliar na interpretação de dados de satélites; e) danos causados por eventos episódicos; f) cadastro de imóveis rurais; g) práticas de conservação de solos e h) classificação e mapeamento de solo.

Apesar da alta qualidade das informações contidas nas fotografias aéreas, sua utilização na agricultura requer um cuidadoso planejamento devido à complexidade e dinâmica das atividades agrícolas. No planejamento da cobertura aerofotográfica devem ser observados alguns critérios básicos tais como: época de aquisição, tipo de filme, escala das fotografias, etc. Neste capítulo trataremos apenas da metodologia de interpretação de fotografias aéreas, após a realização do aerolevanteamento.

O termo fotointerpretação refere-se ao conjunto de todos os processos envolvendo a análise visual de imagens fotográficas (Dainelli, 1990). Segundo este autor, o produto a ser fotointerpretado pode ser fotografias aéreas, imagens obtidas por satélites ou qualquer outro na forma fotográfica. Entretanto, tradicionalmente e, em muitos dos casos práticos, trata-se a fotointerpretação como sendo a análise de fotografias aéreas.

De acordo com o manual de interpretação fotográfica da Sociedade Americana de Fotogrametria (1960) a "interpretação fotográfica é o ato de examinar imagens fotográficas com o objetivo de identificar objetos e o seu significado". É importante salientar que esse conceito de interpretação fotográfica é aplicado às imagens obtidas com dados orbitais, com pequenas modificações, as quais veremos mais adiante.

A fotointerpretação é um processo que envolve pelo menos duas etapas: observação e interpretação. Há autores que dividem o processo de interpretação em três fases, ou seja, a fotoleitura, a fotoanálise e a fotointerpretação propriamente dita.

O processo de fotoleitura é muito similar ao que Dainelli (1990) chama de observação. Esta fase consiste essencialmente em analisar as fotografias aéreas de uma maneira muito superficial, com o propósito apenas de reconhecer as diferentes feições existentes na paisagem. Nesta fase, não há nenhum compromisso com a identificação correta dos alvos e, é nela que também é feita uma análise do tipo de produto fotográfico (tipo de filme utilizado, época de aquisição das fotos, etc).

O processo de fotoanálise consiste em um estudo de avaliação e ordenação das partes que compõem a fotografia. Neste caso, o fotointérprete começa a utilizar seus conhecimentos técnicos e suas experiências práticas do seu campo de trabalho. Durante esta etapa, é feita uma legenda de interpretação, separando as diferentes feições contidas na foto em função do padrão fotográfico apresentado.

A fotointerpretação é o processo em que o intérprete utiliza um raciocínio lógico, dedutivo e indutivo para compreender e explicar o comportamento de cada objeto contido nas fotos. A fotointerpretação é, a rigor, realizada com base em certas características, que muitas vezes são utilizadas pelo fotointérprete sem que ele perceba, devido à rotina do trabalho de fotointerpretação. As principais características são:

11.1.1 – Padrão

O padrão é uma característica muito importante utilizada na interpretação visual tanto em fotografias aéreas quanto em imagens de satélites.

Em áreas vegetadas, o padrão refere-se à distribuição espacial de algumas feições características

de determinadas vegetações, que podem variar de uma região para outra. Por exemplo, a presença de carreadores no meio da área é um padrão que serve para diferenciar áreas plantadas com cana-de-açúcar de áreas de pastagem. Nas áreas de pastagem a presença de carreadores não é comum.

Por outro lado, a presença de carreadores nem sempre significa áreas ocupadas com a cultura da cana-de-açúcar, áreas de reflorestamento também possuem carreadores. Nesta situação, a diferença entre estes dois alvos se dá pela utilização de outras características, tais como o tamanho das áreas de cada talhão entre carreadores, a textura fotográfica, entre outros, conforme veremos mais adiante.

Outro padrão bastante característico é o da drenagem dos rios e córregos existentes na área fotografada. Geralmente, o padrão da drenagem, quando observados em fotografias aéreas, lembra a distribuição dos vasos sanguíneos do corpo humano, e está associado aos tipos de rochas e solos existentes na área mapeada. Na Figura 11.1 é mostrado o esquema de alguns tipos de drenagens.

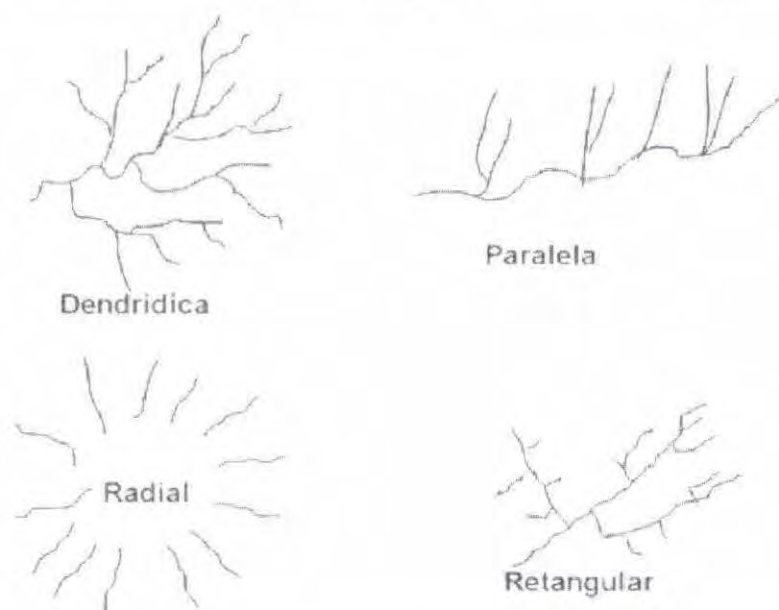


Fig. 11.1 – Esquemas de padrões de drenagens comumente encontrados.

O padrão dendrítico, quando apresenta um espaçamento entre tributários e rios principais menos de $\frac{1}{4}$ de polegada, na escala 1: 20.000, é um indicador de alto nível de escoamento superficial “runoff”, sugerindo a presença de rochas e/ou solo de textura fina de baixa permeabilidade (Travaglia, 1990).

Quando o espaçamento dos rios e tributários for de média intensidade (entre $\frac{1}{4}$ a 2 polegadas), indica a presença de solos e rochas de textura nem fina e nem grosseira mas, sim, uma mistura de partículas de diferentes tamanhos.

Por outro lado, se a drenagem apresenta uma intensidade de rios e tributários maior que 2 polegadas, é uma forte indicação de tipos de solos permeáveis, resistentes, com material rochoso permeável de textura grosseira.

O padrão radial geralmente está associado a um material resistente ou a situações do relevo, como topo de morro, etc.

O padrão de drenagem paralelo está relacionado a solos homogêneos, com declividade uniforme, como por exemplo, solos oriundos de grandes derramamentos basálticos.

11.1.2 – Tonalidade e Cor

Os diferentes alvos sobre a superfície terrestre refletem a energia solar de maneira diferenciada. Por exemplo, um telhado de alumínio pode ser visto de longe porque reflete muita energia que chega até ele. Por outro lado, um pano preto reflete muito pouca luz por que absorve muito. Assim, se nós

observarmos a natureza perceberemos que cada alvo reflete de uma maneira diferente do outro. Quando os alvos são semelhantes entre si, as energias refletidas por eles são muito parecidas, é o caso, por exemplo, de uma área plantada com arroz e outra com trigo, ambas com a mesma porcentagem de cobertura do solo.

Numa foto ou numa imagem de satélite, estas diferentes quantidades de energia refletida pelos alvos são associadas a valores de níveis de cinza (chamado de tons de cinza), ou seja, quando o objeto reflete muita energia a quantidade que chega ao sensor (fotográfico ou não) é grande. Neste caso, associa-se a esta quantidade de energia um nível de cinza claro. Por outro lado, se o objeto reflete pouco, a quantidade de energia que chegará no sensor é também pouca. Logo, o nível de cinza associado ao objeto será mais escuro. Na Figura 11.2 é mostrada uma cena fotografada em preto e branco, contendo diferentes tonalidades de cinza, para representar os alvos na área fotografada.



Fig. 11.2 – Foto aérea para mostrar diferentes tons de cinza dos alvos fotografados

A tonalidade é um parâmetro qualitativo, ou seja, indica a presença de alvos com reflectâncias diferentes. Entretanto, conforme pode ser observado na Figura 11.2, às vezes dois alvos distintos apresentam tonalidades (tons de cinza) semelhantes, como é o caso da área circular (corpo d'água) e áreas de florestas (área triangular no lado direito da foto). Percebe-se também que um mesmo tipo de vegetação pode apresentar tons de cinza diferentes, como é o caso da pastagem que apresenta tons de cinza médio mais escuro e outro mais claro. Por esta razão, não se deve nunca utilizar apenas a tonalidade como critério de separação entre dois temas observados nas fotografias aéreas.

As gradações de cinza numa fotografia dependem: das características da emulsão, do processamento fotográfico, das propriedades físico-químicas dos alvos fotografados, das condições de iluminação/topografia e atmosfera. Assim, a latitude, mês e hora são variáveis que interferem na qualidade das informações contidas

nas fotografias. Devido a esses fatores, é importante deixar claro que haverá mudanças na tonalidade da fotografia, porém isso não quer dizer que se um alvo é branco torna-se escuro enquanto outros permanecerão inalterados. A mudança ocorre na cena toda e, geralmente, numa gradação suave.

A cor é muito empregada no lugar da tonalidade, porque nossos olhos estão mais habituados a enxergar objetos coloridos do que objetos em tons de cinza.

Na fotointerpretação a cor é usada como parâmetro para discernir tipos diferentes de vegetação ou estágio de desenvolvimento de uma determinada espécie, principalmente quando se trata de áreas agrícolas. Em fotografias aéreas coloridas normais, o verde mais escuro significa maior quantidade de vegetação. Áreas desnudas ou com pouca vegetação, geralmente, apresentam cores avermelhadas ou um verde-avermelhado, em razão da contribuição do solo de fundo. A seguir, no exemplo de Figura 11.3, percebe-se claramente as diferenças de coloração associadas ao tipo de vegetação.

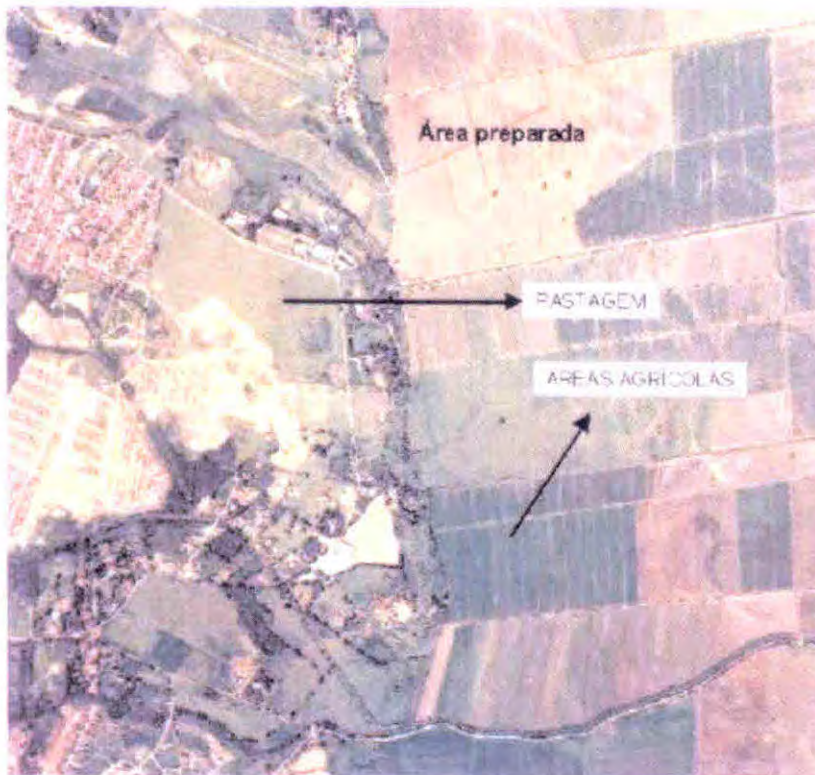


Fig. 11.3 – Foto aérea, contendo diferentes colorações associadas a diferentes tipos de ocupação do solo.

Apesar da fotografia da Figura 11.3 aparentar um desbalanceamento de cor, devido a alguma interferência externa, percebe-se que áreas com vegetação mais densa, apresentam-se em cor verde mais escura, como no caso das áreas agrícolas. À medida que a vegetação vai se tornando menos densa, como é o caso da pastagem, nota-se que há uma mistura de cor verde e vermelho-amarela. Nas áreas preparadas para o plantio é evidente a cor do solo, que nesta região, é apresentado por uma coloração vermelho-amarela.

Essas diferenças da energia refletida estão relacionadas com: idade da planta, número de planta por área de solo, tipo de vegetação, quantidade de folhas, sanidade da planta, entre outras.

Com o desenvolvimento do filme “infravermelho colorido”, também chamado de “infravermelho falsa cor”, houve um impulso muito grande de sua utilização no mapeamento de áreas vegetadas. A grande vantagem do uso de fotografias infravermelhas falsa cor, em relação às coloridas normais, reside no fato de que elas contêm informações sobre a radiação eletromagnética da região do infravermelho próximo. Como a vegetação reflete mais esta radiação, torna-se mais fácil identificar tipos diferentes de vegetação que aparentemente são muito semelhantes nas fotos aéreas coloridas normais. As diferenças observadas no matiz do magenta, numa fotografia infravermelha falsa cor, podem estar relacionadas a diversos fatores tais como: tipo de vegetação, espaçamento entre linhas de plantio e entre pés, estado fenológico, estado fitossanitário, estresse hídrico, excesso de umidade do solo, etc. Essa diferença no matiz do magenta é mostrada na Figura 11.4.



Fig. 11.4 – Foto aérea infravermelho falsa cor, para mostrar diferenças no matiz do magenta, em função do tipo de ocupação do solo.

Observa-se na Figura 11.4, que a cultura da cevada (C) apresenta dois padrões da cor magenta, relacionados a alguns dos fatores citados nos parágrafos anteriores. Um magenta mais homogêneo, tendendo para um rosa claro (parte central da fotografia), e um magenta mesclado com fundo esverdeado (talhão na parte superior esquerda). A cultura do trigo, por sua vez, também apresenta dois padrões da cor magenta. Um padrão bem parecido com a cevada (canto inferior esquerdo) e outro num magenta bem forte, tendendo para a cor vermelha. Em ambas as culturas, essas diferenças de coloração estão relacionadas com a porcentagem de cobertura do solo que pode estar relacionado, entre outras coisas, com a idade da planta, deficiências nutricionais, etc.

Apesar das áreas de alguns talhões de mata natural apresentarem formas regulares, dando idéia de áreas reflorestadas, a textura fotográfica de aspecto rugoso, leva ao fotointérprete definir essas áreas como sendo de mata natural e não áreas reflorestadas, que apresentam textura lisa.

11.1.3 – Forma e Tamanho

O conhecimento da forma que um objeto apresenta no mundo real, é muito importante para auxiliar o fotointérprete na sua identificação, quando observado numa fotografia aérea ou numa imagem de satélite. Entretanto, é preciso ter em mente que só a forma do objeto, muitas vezes não é suficiente para identificá-lo, porque outros alvos da superfície também podem apresentar formas semelhantes. Em outras palavras, a forma é muito importante, desde que esteja associada a outras características.

Em fotografias aéreas é comum utilizar, além da forma, o tamanho dos alvos como critério de identificação. Por exemplo, áreas agrícolas têm formas regulares e bem definidas, pois as culturas são plantadas em linhas. Todavia, o tamanho das áreas destinadas ao plantio de horticultura é muito menor do que as áreas destinadas ao plantio de cana-de-açúcar, arroz ou milho. Assim, o tamanho pode ser usado como um critério de separação dessas diferentes culturas agrícolas.

Ainda sobre este aspecto, podemos citar o caso de duas áreas planas, sendo uma plantada com reflorestamento e outra com café. A principal distinção entre elas diz respeito a forma de plantio e tamanho dos talhões. Geralmente, áreas reflorestadas apresentam uniformidade no tamanho dos talhões, o que não acontece com as áreas de café. Além disso, nas áreas ocupadas com café facilmente percebe-

se a presença do plantio em nível.

Outro exemplo que enfatiza bastante a questão da forma é o das áreas irrigadas. Quando vistas numa fotografia aérea ou em imagens de satélites, apresentam formas circulares denotando a presença de irrigação por aspersão, em que o equipamento empregado move em círculo (Figura 11.5).

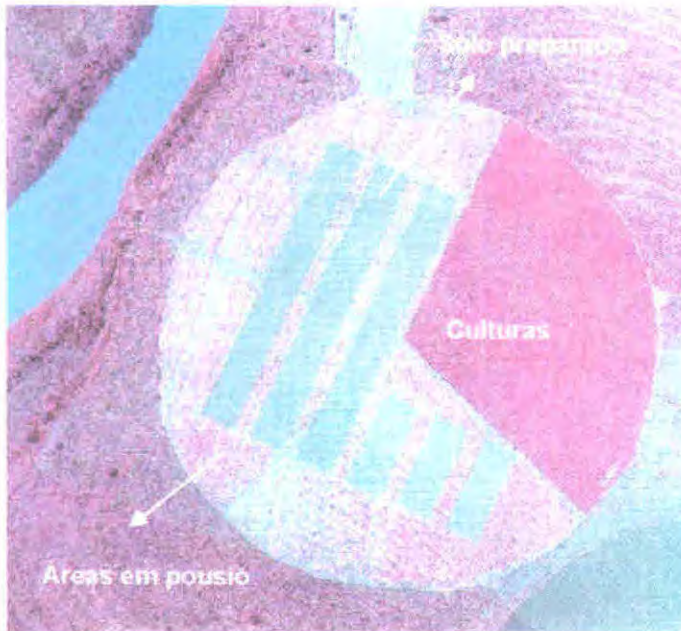


Fig. 11.5 – Foto aérea contendo um pivô central com diferentes tipos de ocupação do solo.

Os rios e córregos geralmente apresentam formas sinuosas. Para rios largos, além da sinuosidade a largura da lâmina d'água é outro fator que distingue, por exemplo, o rio principal de seus tributários. Em muitas situações, tanto o rio principal quanto os tributários são bastante estreitos. Neste caso, a definição da drenagem quanto aos rios principais e tributários é feita com base no comprimento da bacia hidrográfica.

As cidades, quando vistas numa fotografia aérea, apresentam formas reticuladas, devido aos cruzamentos de suas avenidas e ruas, conforme pode ser visto na Figura 11.3.

11.1.4 - Textura

A textura, nas fotografias aéreas, é produzida através de agregamento de vários alvos que na sua individualidade, não podem ser detectados. Em outras palavras, a textura pode ser entendida como sendo o padrão de arranjo espacial dos elementos texturais. Elemento textural é a menor feição contínua e homogênea distinguível em uma fotografia aérea, porém passível de repetição, por exemplo, uma árvore. De acordo com a definição de elemento textural é possível entender que a textura depende da escala e, no caso de imagens de satélite, da resolução espacial. A textura varia de lisa a rugosa, dependendo das características dos alvos, resolução espacial e escala.

A textura pode ser influenciada pelo efeito de sombreamento, como ocorre em áreas com mata natural. As matas naturais possuem dosséis irregulares, devido às diferenças nos tamanhos das árvores. As árvores maiores incidem sombreamento nas copas das árvores menores e, conseqüentemente, a reflectância é menor (menor intensidade de luz que sai do dossel). Quando a mata natural é observada na fotografia aérea, há sensação de rugosidade na textura, que nada mais é do que a diferença na intensidade da luz refletida pelas árvores mais altas e as mais baixas. Este é um dos critérios adotados para separar áreas de mata natural de áreas reflorestadas, que apresentam uma textura mais lisa. Na Figura 11.6 é mostrada uma fotografia aérea contendo alvos com textura lisa e rugosa.

Fig. 11.6 – Foto aérea colorida normal, para mostrar textura lisa e rugosa e sombreamento.



11.1.5 - Sombra

A sombra é outra característica importante que deve ser levada em consideração, durante a fase de fotointerpretação, principalmente, no caso de interpretação de imagens de satélites. A sombra, na maioria das vezes, dificulta a fotointerpretação, por que geralmente omite a informação do tipo de ocupação do solo na região onde ela está sendo projetada. Às vezes, a sombra deixa de ser um fator negativo e passa a ser positivo no auxílio para separar diferentes tipos de vegetação, como é o caso ilustrado na Figura 11.6.

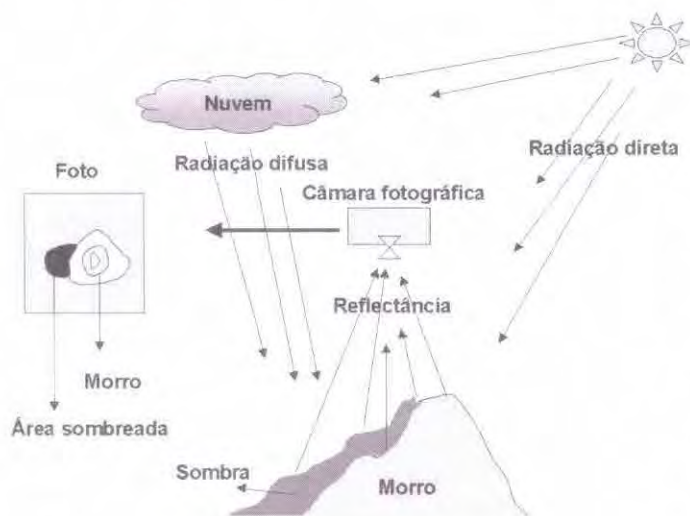


Fig. 11.7 – Esquema para simular o efeito de sombreamento provocado pelo relevo.

De modo geral, o relevo sempre provoca sombra do lado oposto a incidência da luz solar e, com isto, nos locais onde há sombra, a incidência de luz é muito baixa, conseqüentemente, pouca energia é refletida, fazendo com que estas áreas apresentem-se em tons de cinza ou cores muito escuras, dificultando assim, a identificação e a delimitação dos limites dos talhões dos diferentes alvos de ocupação do solo, conforme é ilustrado no exemplo da Figura 11.7.

11.2 Fotointerpretação Propriamente Dita

A metodologia para realizar a fotointerpretação, como dito anteriormente, depende do objetivo a que se destinam os resultados obtidos. Por exemplo, se a utilização dos resultados requer precisão de área, inicialmente as fotos devem passar por um processo de retificação fotográfica, para equalizar a escala de trabalho.

Pode-se adotar duas abordagens de fotointerpretação: sem conhecimento de campo e com conhecimento de campo.

No primeiro caso, é feita a individualização das áreas que apresentam diferentes tonalidades ou cores dentro da área fotografada. Para realizar este processo, é sobreposto às fotografias um papel transparente, por exemplo, pode-se utilizar o “Terkron” de espessura de 50m. Sobre esta base, são delimitados os limites dos diferentes talhões e outras feições da área tais como rios, estradas, etc. Os talhões delimitados recebem uma legenda diferenciada para cada tipo de feição observada nas fotografias.

Após a interpretação é feito um mosaico da área de estudo que consiste em juntar os resultados da interpretação feita em cada foto num resultado único (mapa), contendo a distribuição espacial das diferentes feições observadas e delimitadas. Para a montagem deste mosaico, geralmente utiliza-se somente a parte central das fotografias, ou área útil. A legenda pode ser números, letras do alfabeto arábico ou qualquer outro símbolo, preestabelecido.

Realizada a etapa de interpretação é feito um trabalho de campo, para reconhecimento “in locu” do tipo de ocupação do solo em cada uma das feições mapeadas. Nesta etapa, geralmente, são visitadas algumas áreas (talhões) de cada feição mapeada e, com base neste conhecimento, extrapola-se para as demais áreas do mapa que apresentam mesmas características das áreas visitadas. Note bem, para realizar o trabalho de campo, é importante que se faça uma análise criteriosa de todos os alvos que serão visitados no campo, pois o retorno na área de estudo, para eliminar algumas dúvidas durante a interpretação, às vezes é inviável.

Para o trabalho de campo, deve-se levar além do mapa preliminar da fotointerpretação, um questionário de campo, para ser preenchido com informações fornecidas pelo proprietário, a respeito das áreas visitadas.

Feito o trabalho de campo, o fotointérprete realiza uma segunda interpretação, para rotular cada área individualizada, segundo a ocupação do solo, tendo como base, as informações coletadas no campo.

O mapa obtido desta interpretação pode passar por um acabamento mais refinado de desenho ou ser digitalizado no computador, para criar um arquivo digital onde é, então, calculada a área de cada tema fotointerpretado.

11.3 Cálculo de Área

O cálculo de área pode ser feito por diferentes métodos conforme descrito a seguir:

11.3.1 – Método de Contagem

Por este método, a área é calculada com o auxílio de um papel vegetal milimetrado, transparente, sobreposto ao mapa temático. No papel milimetrado é feita a contagem do número de quadrículas contidas dentro dos polígonos, de cada classe temática individualizada na área de estudo. Sabendo-se quanto vale a área de cada quadrícula (função da escala), a área da classe temática resulta da soma das quadrículas multiplicada pelo valor da área da quadrícula. No caso de quadrículas parcialmente inseridas no polígono, uma abordagem utilizada para a contagem refere-se ao critério da compensação, ou seja, somam-se os pedaços das quadrículas dentro do polígono até que se obtenha uma quadrícula inteira. Na Figura 11.8 é ilustrado o cálculo da área para um talhão hipotético extraído de um mapa temático.

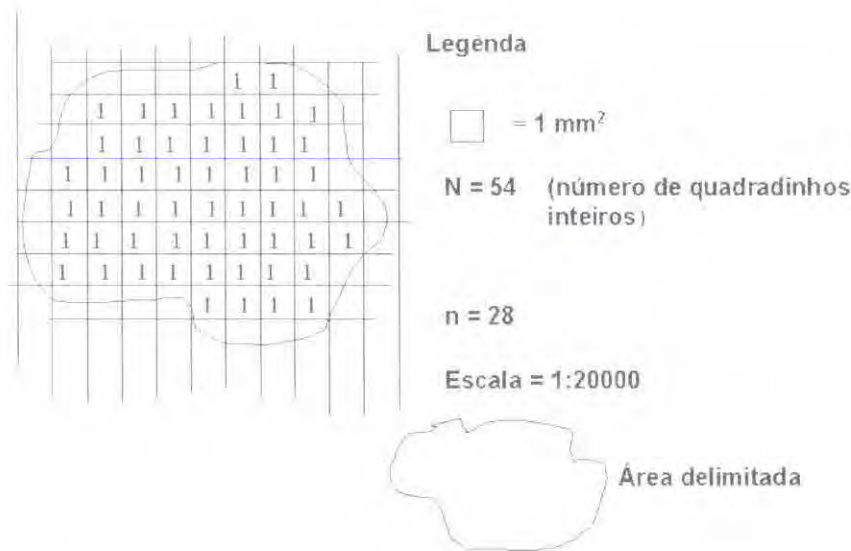


Fig. 11.8 – Esquema para mostrar a utilização da malha milimétrica para cálculo de área

onde, **n** é igual ao número de quadrículas parciais, dentro da área delimitada. Neste exemplo, cada **n** é mais ou menos a metade de **N** (quadrícula com o número 1).

Para saber quantos **N** equivale os **n** pequenos, é só multiplicar por 0,5.

$$N = n \times 0,5 = 28 \times 0,5 = 14$$

Para o talhão temos **N** (total) = 54 + 14 = 68.

$$A = \frac{N \times (De)^2}{1.000.000} \quad (11.1)$$

onde, **De** é o denominador da escala fotográfica.

11.3.2 – Método de Pesagem

Este método tem como base o princípio de que a relação existente entre as áreas de dois pedaços de papel é a mesma existente entre seus respectivos pesos.

No método de pesagem, inicialmente as áreas delimitadas são copiadas num papel de espessura perfeitamente constante. Em seguida, corta-se outro pedaço de papel, de geometria conhecida, por exemplo, retangular. Calcula-se a área deste papel e seu peso. Assim, tendo o peso das áreas delimitadas torna-se fácil calcular a sua área. A relação entre os pesos "P" do talhão delimitado e o peso "p" do retângulo delimitado será:

$$A = Aq \times P/p \quad (11.2)$$

onde, **A** é a área do talhão (depende da unidade utilizada), **Aq** é a área do quadrado, depende da escala usada.

11.3.3 – Método de Planimetragem

Este método tem sido, até então, muito utilizado no cálculo de áreas de propriedades rurais para fins de inventários. O equipamento empregado no cálculo da área é o planímetro, cuja ação baseia-se numa integração mecânica. Neste procedimento, a ponta de fixação da haste do planímetro deve permanecer presa fora do perímetro da área a ser medida. A outra ponta deve passar sobre o contorno do perímetro, no sentido horário. O planímetro nos fornece uma leitura com 4 algarismos, e a área em metros quadrados é dada pela seguinte expressão:

$$A = \frac{L \times (De)^2}{K \times 10.000} \text{ (m}^2\text{)} \quad (11.3)$$

onde, **A** é a área em m², **L** é a leitura do planímetro, **De** é o denominador da escala da fotografia e **K** é uma constante, cujo valor é 10, quando o planímetro tiver seu braço ajustado em 14,95.

11.3.4 – Uso de computador

Com o desenvolvimento da informática e dos sistemas de geoprocessamento, surgiram diversos programas que permitem calcular a área de polígonos regulares e irregulares. Neste caso, os limites das áreas são introduzidos no computador por meio de uma mesa digitalizadora, devidamente acoplada ao computador. Após a digitalização dos polígonos é feito o cálculo da área. Este procedimento é bastante fácil e minimiza muitos erros de omissão e de inclusão de áreas, os quais são cometidos nos outros processos discutidos acima. Além disso, outras vantagens do uso do computador são: a) possibilita armazenar grande número de informações; b) permite fazer cruzamento dos dados armazenados; c) permite editar mapas em quaisquer escalas e d) permite sobrepor as informações temáticas com dados obtidos por outros sensores.

11.4 Interpretação de Dados Videográficos

Os dados obtidos pelo processo de videografia são dados digitais, por isso, requerem o uso de computador. A interpretação deste tipo de dados envolve diversas etapas, conforme descritas a seguir.

11.4.1 – Captura das Cenas de Interesse

Após as operações de sobrevôo, as fitas digitais são lidas em um sistema montado para realizar a captura das cenas de interesse e recuperar os dados do GPS gravados na trilha sonora. Esse sistema, mostrado na Figura 11.9, compreende um gravador VCR digital SONY (DHR1000) acoplado a uma placa de captura de vídeo digital (DVBK-2000) instalada em um computador PC.



Fig. 11.9 – Diagrama dos equipamentos de captura dos dados.
FONTE: Correia, 1999.

O registro nas fitas digitais é de 30 cenas (frames) por segundo, e um programa especial (SONY DVapp) permite navegar na gravação fazendo a seleção e a captura das cenas de interesse no tamanho de 640 x 480 pixels, que podem ser no formato BMP (901K) ou JPEG (146K na qualidade *Better*). Durante esse processo, uma unidade HORITA WG-50 (que é semelhante à utilizada no vôo) é acrescentada numa ligação em série entre o gravador VCR e a TV portátil, de tal forma que os dados GPS HORITA gravados na trilha sonora sejam superpostos às imagens no momento da captura das cenas, para sua localização. Na captura, pode-se definir qual a taxa de amostragem a ser utilizada, influenciando na superposição das cenas. Na Figura 11.10 é mostrado um exemplo de cenas capturadas com uma taxa de 1 frame a cada 2 seg, (superposição em torno de 80%).



Fig. 11.10 – Sequência de frames capturados com uma taxa de 1 frame a cada 2 segundos. FONTE: Correia, 1999.

11.4.2 – Mosaicagem e Georeferenciamento dos Frames

Para a realização da mosaicagem das áreas de interesse existe um procedimento mais antigo que é a utilização do software ENVI, no qual é necessário mosaicar frame a frame, o que despande muito tempo. Porém, na missão LBA, realizada sobre vários locais da Amazônia, foi utilizado um novo “software”, denominado de VideoBrush. O VideoBrush permite a realização do mosaico de todos os frames de uma mesma faixa ou de várias faixas adjacentes. A grande vantagem deste “software” em relação ao ENVI é a rapidez na confecção do mosaico. Na Figura 11.11 pode ser visto um exemplo



Fig. 11.11 – Exemplo de mosaico confeccionado pelo software VideoBrush. FONTE: Correia, 1999

de mosaico confeccionado com o VideoBrush, em que foram utilizados 10 frames.

A análise das informações contidas no mosaico originado pode ser realizada através da abordagem visual ou por computador.

No processo visual, as informações contidas no mosaico são plotadas em papel para realizar a fotointerpretação, utilizando a metodologia descrita no item anterior.

A análise dos dados videográficos, no formato digital, é feita semelhantemente à metodologia adotada para dados de satélites no formato digital, conforme veremos no capítulo 15.

Capítulo 12

Considerações gerais sobre análise de dados coletados por sensores em nível orbital

As imagens digitais de alvos da superfície terrestre, que são registradas pelos sensores orbitais, como o sensor TM do Landsat, o HRV do SPOT, entre outros, após serem transmitidas para as estações terrenas, são transformadas em dois tipos de produtos: analógico e digital.

Os produtos analógicos são, via de regra, tratados pelo processo de interpretação visual, também denominado de fotointerpretação, conforme foi discutido no capítulo anterior. Os produtos digitais, na maior parte das aplicações, são tratados por métodos específicos de análise de dados, implementados em computadores. Entretanto, os dados digitais podem ser utilizados em computadores com o intuito apenas de melhorar ou ressaltar alguns aspectos da imagem, a fim de obter um produto analógico que melhor contraste certas feições da imagem. O produto resultante deste melhoramento pode, então, ser impresso para que seja feita a interpretação visual.

Vale a pena lembrar que em muitos artigos ou trabalhos, envolvendo o uso de dados de satélites orbitais, os autores utilizam o termo “imagens de satélites” para designar o produto analógico (fotográfico) e, quando se refere aos produtos no formato digital é comum o termo “dados digitais”.

No capítulo 11, item 11.1, vimos que a interpretação visual de fotografias aéreas ou fotointerpretação é feita com base em certas características tais como: padrão, tonalidade/cor, textura, sombra, etc. No caso de interpretação visual de dados orbitais, o fotointérprete baseia-se fortemente nestas características durante as fases da fotointerpretação. Além dessas características, há outros fatores relacionados aos dados coletados e ao fotointérprete, os quais serão discutidos a seguir.

12.1 Fatores que Contribuem para o Êxito na Análise de Imagens de Satélites

Os fatores gerais que contribuem no êxito da análise de dados de satélites são basicamente cinco: a) época de obtenção das imagens de satélite; b) tipo de produto; c) bandas espectrais; d) escala das imagens e e) experiência do fotointérprete.

12.1.1 - Época de Obtenção das Imagens de Satélite

Embora pareça desnecessário comentar sobre a época de aquisição das imagens de satélite, este fator influencia muito no sucesso ou não do analista em obter resultados sobre os alvos na superfície terrestre.

Para ilustrar este fato, imaginemos uma situação em que se pretende mapear áreas ocupadas com a cultura da soja, numa determinada região, por exemplo, do Estado de São Paulo. A soja é cultura de verão (cultivada no período de maior precipitação pluviométrica outubro a março). Entretanto, nessa mesma época são cultivadas, também, outras culturas de verão como o milho, arroz, feijão, etc. Diante dessa situação, a pergunta é: qual seria a melhor data, dentro desse período, para adquirir uma imagem de satélite, para identificar e mapear a soja?

Para obtermos a resposta é necessário que façamos algumas considerações a respeito da prática agrícola da cultura e das restrições impostas por parte dos dados nas imagens do satélite.

Quanto à cultura da soja, sabemos que após o plantio haverá a emergência e o crescimento da planta, até atingir o seu completo desenvolvimento vegetativo, que coincide com o início da fase de floração. Até esta fase, a resposta espectral da cultura é muito influenciada pela resposta espectral do solo, que será maior ou menor dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura. O sinal registrado nas imagens do satélite será uma mistura da resposta espectral da cultura e do solo. Por esse motivo, é comum o uso da expressão "pixel misturado". Inicialmente, o "pixel misturado" terá maior contribuição da resposta espectral do solo, que vai diminuindo à medida que a cultura da soja vai cobrindo o solo e passa, então, a influenciar mais no comportamento espectral do que o solo, pelo fato de aumentar a cobertura do solo.

Por outro lado, após a fecundação e enchimento dos grãos, a cultura entra numa fase de declínio (senescência), voltando o solo a exercer influência no comportamento espectral do dossel da cultura.

Estas situações deixam claro que a melhor época de seleção de imagens de satélites, para identificar e mapear áreas dessa cultura, é no período que vai do início da floração até o enchimento de grão, período este em que a cultura está completamente desenvolvida e com intensidade máxima de atividade fotossintética. Daí a razão da escolha de uma data ideal para realizar a interpretação das imagens, seja de forma visual ou digital.

Ainda dentro deste contexto, outra pergunta seria: é possível obter imagens no período em que a cultura da soja está na fase de florescimento e enchimento de grãos?

Para elucidar esta dúvida devemos analisar as restrições técnicas impostas pelos sensores a bordo dos satélites e pelo meio ambiente. Como foi discutido anteriormente, devido à faixa espectral de atuação dos principais sensores óticos, a presença de nuvens sobre a área de interesse é o fator que limita na escolha da melhor data de passagem do satélite para obter imagens. As nuvens impedem que a energia, na região do visível e do infravermelho próximo, refletida pelos alvos da superfície terrestre, chegue até o sensor. Desta forma, nem sempre há disponibilidade de imagens, livres de cobertura de nuvens, no período de floração e enchimento de grão. A restrição neste caso, é condicionada às condições meteorológicas e as faixas de atuação dos sensores.

Para contornar este problema, empregam-se imagens de duas ou mais passagens do satélite dentro do ciclo da cultura. Assim, se numa época é possível mapear área preparada para o plantio (lembrando que podem ser plantadas várias culturas ao mesmo tempo), na outra é bem provável que seja possível separar áreas plantadas com soja, daquelas ocupadas com outras culturas de verão, mesmo não sendo uma imagem de uma época ideal. Neste caso, assume-se que culturas diferentes apresentam ciclos de crescimento e desenvolvimento, também diferentes.

Para algumas culturas, principalmente, aquelas de ciclo perene ou semiperene, como a cana-de-açúcar, o café, citrus, etc, a época de seleção de imagens de satélites não é um problema sério, porque se pode utilizar imagens de épocas com menor índice de precipitação pluviométrica aumentando, assim, a probabilidade de adquirir imagens livres de cobertura de nuvens.

Uma maneira de facilitar muito esta etapa de seleção é fazer o calendário agrícola de todas as culturas da região.

Nas Figuras 12.1A e 12.1B, podem ser vistas duas imagens do Landsat-TM obtidas em datas diferentes, ou seja, uma obtida numa época ideal para o mapeamento da cultura da soja (29/01/1996) e a outra num período em que a cultura já havia sido colhida (04/05/1996).

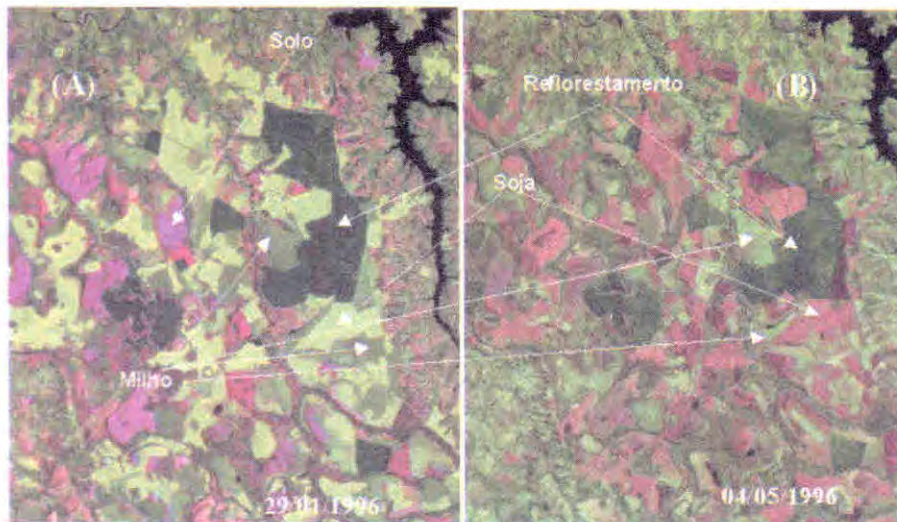


Fig. 12.1 - Composições coloridas [TM3 (azul), TM4(verde), TM5 (vermelho)] de uma área de no Triângulo Mineiro, com cultura de verão, obtidas em 29/01/1996 (A) e 04/05/1996 (B).

Observe na Figura 12.1 A que a cultura da soja, neste período, apresentou uma resposta espectral bastante distinta dos demais alvos na região (amarelo-esverdeado). Nesta época, a cultura estava no início da floração. Por outro lado, na Figura 12.1B, nota-se que toda soja já havia sido colhida, pois a resposta espectral das áreas de soja passou de amarelo-esverdeado para uma coloração vermelha-rosa, semelhante a do solo exposto na primeira data. No caso de se utilizar a passagem da data de 04/05/1996 para fazer o mapeamento da cultura da soja, nesta região, para este ano agrícola, o trabalho seria muito exaustivo porque teria que visitar todos os talhões de solo exposto para saber quais deles foram plantados com a cultura da soja e ainda assim seria muito difícil estabelecer os limites físicos das lavouras de soja.

12.1.2 - Tipo de Produto

O tipo de produto (colorido ou em preto e branco) é um critério que o fotointérprete deve levar em conta, dependendo do objetivo do trabalho. Por exemplo, se o usuário está interessado em delimitar o perímetro de um lago, a recomendação é que se use uma imagem obtida na região do infravermelho próximo, tal como a banda TM4 do Landsat. No entanto, se o interesse for estudar a qualidade de água num lago, rio ou represa, deve-se usar informações coletadas na região do visível, preferencialmente, na região do verde, como a banda TM2 do Landsat-5 ou XS1 do SPOT que são as mais indicadas para este estudo.

A razão da escolha de imagens no infravermelho próximo para delimitar o lago está relacionada à absorção quase total desta radiação pela água, conforme foi discutido no capítulo 6. Com a água absorvendo a energia, o sinal de retorno será próximo a zero (diferente de zero devido à radiação espalhada na atmosfera) e será representada na imagem por um cinza bastante escuro, ao passo que, os alvos vizinhos por refletirem a radiação em maior quantidade do que a água, serão representados por níveis de cinza mais claros. Este fato, gera um contraste bastante evidente entre a água e os alvos no entorno, conforme é mostrado na Figura 12.2. Devido à diferença de tonalidade da água e os alvos no entorno, os limites (perímetro) ficam bem individualizados.

Por outro lado, na Figura 12.3 é mostrada uma imagem obtida pelo sensor TM do Landsat-5, na faixa espectral do verde, no qual percebe-se a diferença da qualidade da água da Baía da Guanabara e a água oceânica. Veja que na Baía de Guanabara a água apresenta uma tonalidade mais clara quando comparada às águas oceânicas, denotando assim, presença de material em suspensão. A presença de material em suspensão faz com que a água da Baía de Guanabara apresente uma maior densidade tornando a superfície muito lisa, aumentando assim, a reflexão especular em relação às águas oceânicas.

Podemos observar ainda que os limites da Baía não são tão contrastantes com os alvos vizinhos como no caso da Figura 12.2.

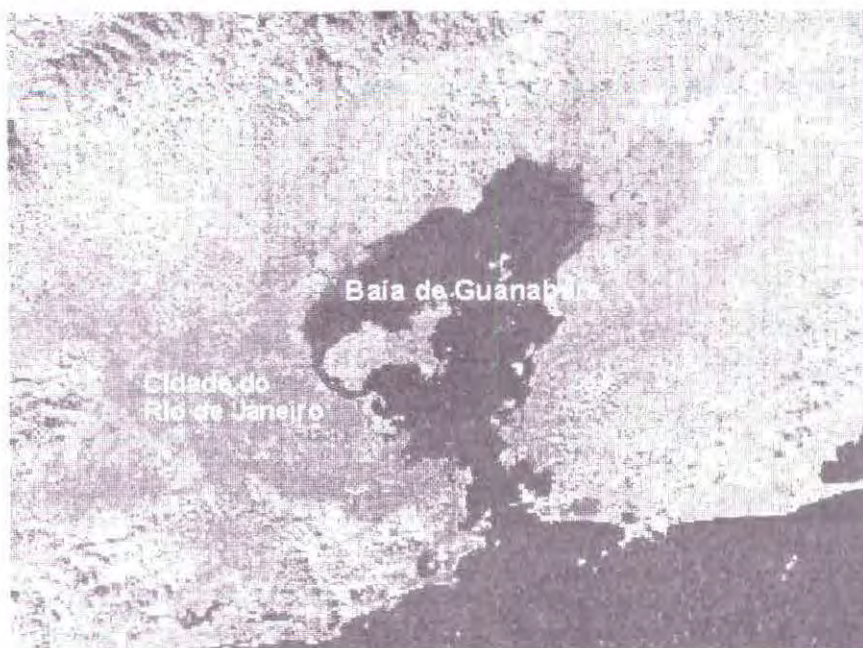


Fig. 12.2 - Imagem obtida na banda TM4 do Landsat-5, para mostrar o contraste existente entre corpo d'água e os alvos no entorno.



Fig. 12.3 - Imagem obtida na banda TM2 do Landsat-5, para mostrar a qualidade da água na Baía de Guanabara.

Para mapeamento de áreas vegetadas tem-se empregado com bastante sucesso composições coloridas, uma vez que o olho humano tem maior facilidade em diferenciar cores do que níveis de cinza. O uso de composições coloridas permite uma maior facilidade, por exemplo, na separabilidade entre tipos de vegetação, bem como outras características desejáveis tais como: desenvolvimento da vegetação, presença de reboleiras causadas por ataque de pragas, doenças ou anomalias no solo, etc.

Os produtos coloridos resultam da combinação de bandas espectrais, sendo que cada banda é associada a uma das cores primárias (azul, verde e vermelha). Dependendo da banda e da cor associada a ela, obtém-se uma determinada cor para cada tipo de alvo sobre a superfície terrestre. No caso das

imagens obtidas pelos sensores TM e o ETM+ do Landsat, é possível fazer uma série de composições combinando quaisquer três bandas espectrais as cores primárias.

Para exemplificar o que foi dito acima, sobre a superioridade dos produtos coloridos em relação aos preto e branco, para identificar e individualizar alvos na superfície terrestre, na Figura 12.4 e 12.5 é mostrada uma área agrícola do Sul do Estado de Minas Gerais na banda TM4 e em composição colorida das bandas TM3(Azul = B), TM4(Vermelho = R) e TM5(Verde = G).

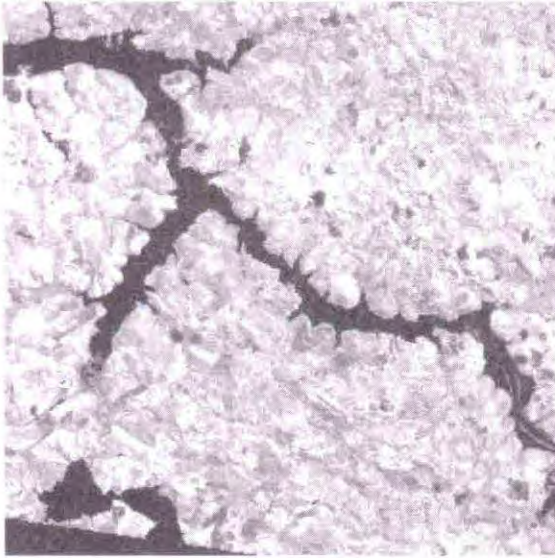


Fig. 12.4 – Imagem da banda TM4, para mostrar que há pouca variabilidade nos níveis de cinza.

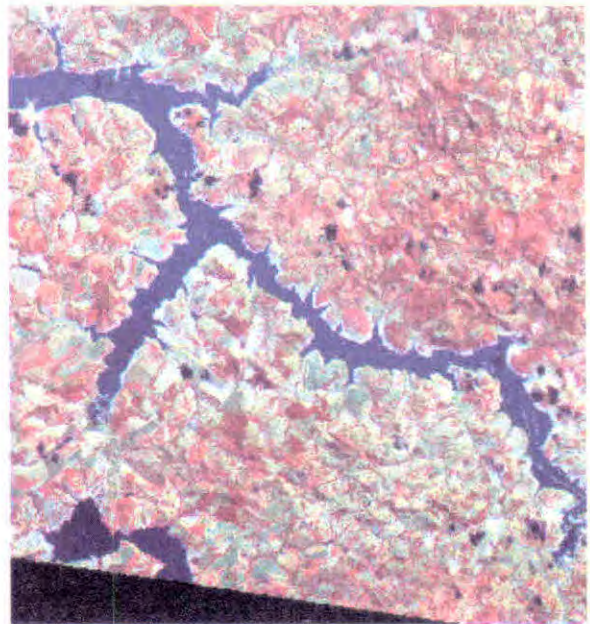


Fig. 12.5 – Composição colorida das bandas TM3(B) e TM4(G) e TM5(R), para mostrar a maior variabilidade de cores associadas a diferentes respostas espectrais dos alvos da superfície terrestre.

12.1.3 - Bandas Espectrais

A escolha das bandas espectrais é outro fator muito importante no sucesso de uma interpretação de imagens de satélite, quer seja de produtos analógicos (fotográficos) ou digitais. A seleção das bandas espectrais vai depender dos objetivos em que estamos interessados. Na Tabela 12.1 são mostradas algumas aplicações em função da faixa espectral que opera o sensor TM do Landsat.

Tabela 12.1 – Principais características e aplicações da radiação eletromagnética, correspondente as bandas do sensor TM do Landsat

Banda	Faixa espectral (μm)	Principais características e aplicações sa radiação correspondente a cada uma das bandas "TM" do Landsat
1	(0,45 – 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos d'água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e outros pigmentos da planta. Apresenta sensibilidade à pluma de fumaça oriundas de queimadas ou outra atividade industrial. Pode apresentar atenuação atmosférica. Aplicação: Oceanografia, Agricultura, etc.
2	(0,52 – 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade de água. Boa penetração em corpos d'água.
3	(0,63 – 0,69)	Região de forte absorção pela vegetação verde. Permite bom contraste entre áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação (solo exposto, estradas e áreas urbanas). Permite análise da variação litológica em locais com pouca vegetação. Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (exemplo: campo, cerrado e floresta). Permite o mapeamento da rede de drenagem através da visualização da mata de galeria e entalhamento dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana.
4	(0,76 – 0,90)	Permite o mapeamento de corpos d'água, pela forte absorção da energia nesta região pela água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muito a energia, aparecendo em tom de cinza claro nas imagens. Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre a geomorfologia, solos e geologia. Serve para separar áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas.
5	(1,55 – 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por deficiência hídrica. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrência de chuvas antes da obtenção da imagem pelo satélite.
6	(10,4 – 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades térmicas de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 – 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre geomorfologia, solos e geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

FONTE: Tabela utilizada pela Divisão de Geração de Imagem (DGI) do INPE.

12.1.4 - Escala de Trabalho

A escala de trabalho é outra característica que deve ficar bastante clara para o fotointérprete, principalmente, quando se trata de dados coletados por sensores orbitais.

No capítulo 7 foi discutido a questão da resolução espacial e como está relacionada com os diferentes sensores. Naquela oportunidade foi dito que a resolução espacial diz respeito à área mínima que é representada por um único sinal na imagem, ou seja, o sinal resultante da média de todas as respostas espectrais provenientes dos diferentes alvos na área, dentro do "pixel". Isto quer dizer que dentro desta área mínima não é possível distinguir os diferentes alvos de ocupação do solo por estarem representados por uma única resposta espectral média. O tamanho desta área depende do sensor utilizado. Por exemplo, o sensor TM do Landsat-5 tem uma resolução espacial de 30m x 30m (900m²), para as bandas TM 1,2,3,4,5 e 7 e de 120m x 120m para a banda TM6. A pergunta que se pode fazer é: como a resolução espacial se relaciona com a escala?

A escala de trabalho nada mais é do que uma ampliação ou redução da imagem sem modificar o seu conteúdo radiométrico, ou seja, o fato de fazer uma ampliação numa área de estudo, por exemplo da escala 1: 250.000 para 1:100.000, não quer dizer que os alvos que antes não eram individualizadas dentro do "pixel", passam a ser distintos na nova escala.

A vantagem na utilização de uma escala maior de trabalho, para fazer interpretação visual de imagens, reside na maior facilidade que o fotointérprete terá para delimitar os diferentes alvos contidos na cena, conseqüentemente, menor erro de área. Além disso, a ampliação da escala facilita, a visualização de áreas com respostas espectrais diferentes que, numa escala menor, essa diferenciação era imperceptível. A seguir é mostrado na Figura 12.6, parte de uma área contida numa cena registrada pelo sensor TM do Landsat-5, que foram geradas no computador nas escalas de trabalho de 1:500.000 (A), 1:250.000 (B) e 1:100.000 (C).

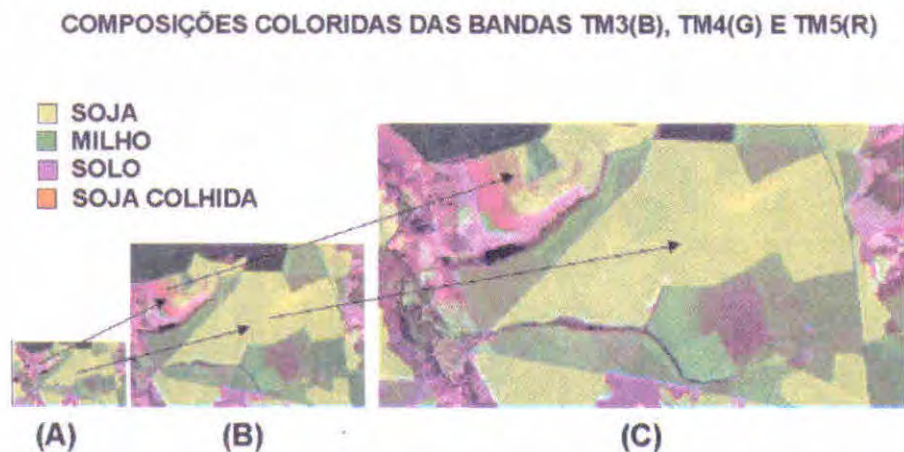
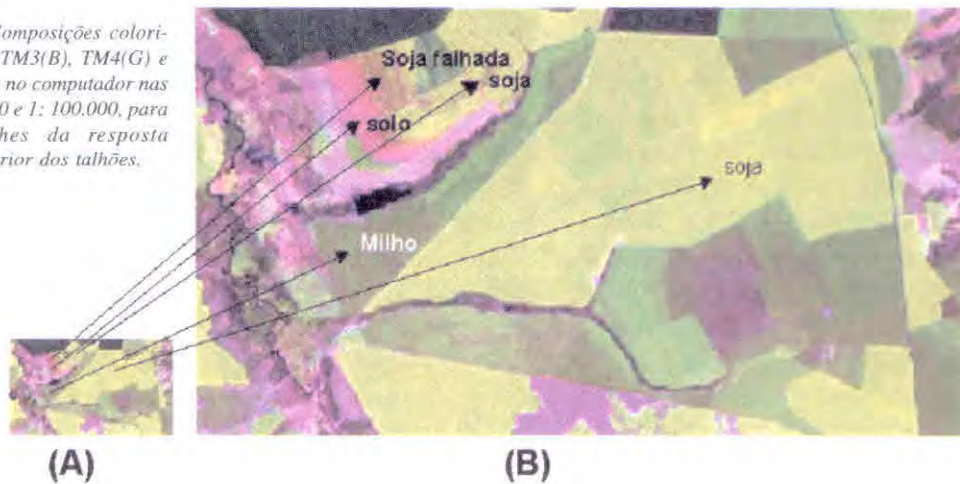


Figura 12.6 – Imagens coloridas, obtidas pelo sensor TM do Landsat em diferentes nas escala de trabalho.

Na Figura 12.7 são mostrados exemplos de áreas de soja, com diferentes respostas espectrais dentro do talhão, que não são perceptíveis na Figura 12.7A e que passam a ser perceptíveis com o aumento da escala de trabalho (Figura 12.7B). Observa-se, ainda, que a soja apresenta áreas com diferentes respostas espectrais. Entretanto, é bom ressaltar, que neste caso não houve modificações radiométricas nos "pixels". O que houve com a ampliação de escala foi uma melhor acuidade visual.

Figura 12.7 – Composições coloridas das bandas TM3(B), TM4(G) e TM5(R), geradas no computador nas escalas 1:500.000 e 1: 100.000, para mostrar detalhes da resposta espectral no interior dos talhões.



12.1.5 – Uso de Imagens Multitemporais

Para muitos dos objetivos, em que se utilizam as técnicas de sensoriamento remoto, o emprego de imagens de satélites coletadas em duas ou mais datas de passagem é inevitável. Por exemplo, nos estudos de expansão de áreas urbanas, no acompanhamento da taxa de desmatamento da Amazônia, na expansão de áreas agrícolas, ou até mesmo no caso de não se dispor de imagens de satélites livres de cobertura de nuvem na época apropriada e para o mapeamento de culturas agrícolas.

Nas regiões de clima tropical, como é a maior parte do Brasil, dificilmente dispõe-se de imagens, livres de cobertura de nuvens, na data ideal para se fazer inventário de grandes áreas, como é o caso da agricultura brasileira de verão. Uma das alternativas que se pode lançar mão, para contornar, em parte, esse problema é o uso de imagens de duas ou mais passagens ou de dois ou mais sensores orbitais, como o sensor TM do Landsat-5, o ETM+ do Landsat-7, o CCD do CBERS e o HRV do SPOT, que coletam informações de uma determinada área em períodos de tempo diferentes.

A seguir serão mostrados, nas Figuras 12.8 e 12.9, dois exemplos de aplicação de dados multitemporais, no estudo de expansão de áreas agrícolas.

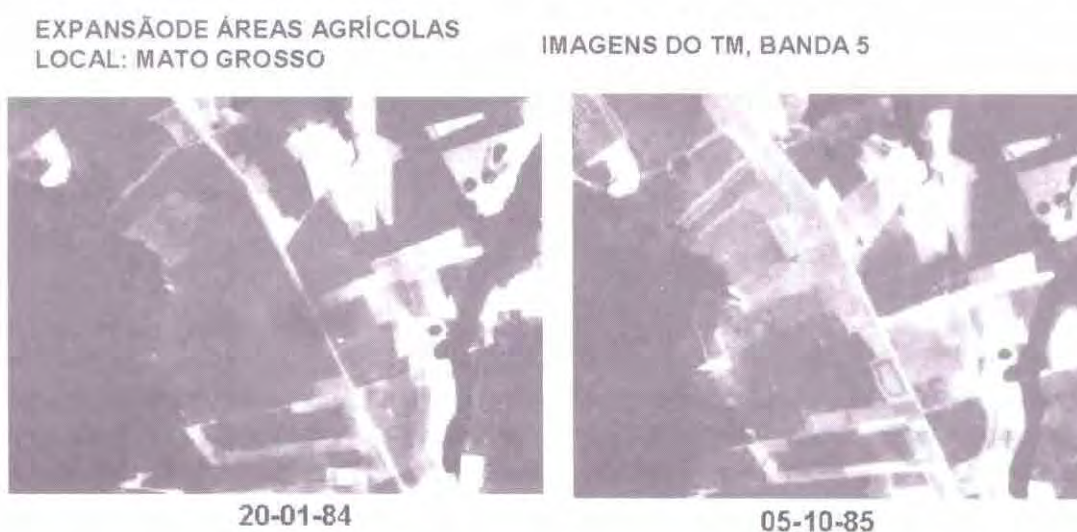


Fig. 12.8 – Imagens do sensor TM do Landsat, banda 5, para mostrar o incremento de áreas agrícolas (cinza claro a médio) numa região do Mato Grosso do Sul, nos anos de 1984 e 1985.

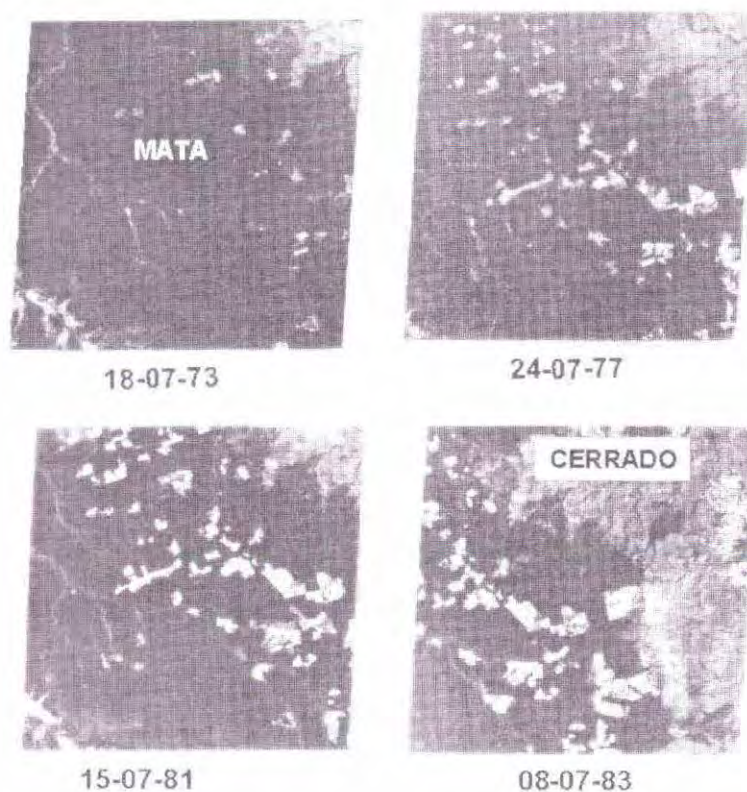


Fig. 12.9 – Imagens do sensor TM do Landsat, na banda TM4, para mostrar a expansão da fronteira agrícola numa região do Mato Grosso, no período de 1973 a 1983.

12.1.6 – Experiência do Fotointérprete

A experiência do fotointérprete é um fator primordial em qualquer trabalho envolvendo o emprego de imagens de satélites, para obter informações sobre os alvos da superfície terrestre. Entende-se por experiência do fotointérprete, o conhecimento tanto das técnicas de sensoriamento remoto quanto a área de especialidade na qual o ele está realizando um determinado estudo. Em outras palavras, é fundamental o especialista ter o conhecimento não só das técnicas de sensoriamento remoto mas também da área de aplicação. Por esta razão, a experiência do fotointérprete deve estar relacionada a três parâmetros básicos: conhecimento do problema, conhecimento da técnica e conhecimento da região.

O conhecimento do problema consiste em levantar a importância que a variável investigada desempenha na sociedade, todos os possíveis métodos de estimativa desta variável, no caso da agricultura, como é cultivada, onde é cultivada, etc. Finalmente, onde o sensoriamento remoto poderá auxiliar na obtenção de resultados mais satisfatórios e a menor custo. Exemplo desta situação poderia ser o caso de se fazer o levantamento de áreas desmatadas na Amazônia Legal ou de áreas cafeeiras no Brasil.

O conhecimento da técnica de sensoriamento remoto é, sem dúvida, o principal fator de sucesso ou fracasso nos trabalhos de levantamentos de recursos naturais, através do sensoriamento remoto. Se o especialista não tem conhecimento, por exemplo, do comportamento espectral dos alvos na superfície terrestre e como estes alvos se manifestam nas imagens coletadas pelos sensores orbitais, por mais conhecedor que seja do assunto sobre o alvo, o fracasso na obtenção de qualquer resultado é grande.

O conhecimento da região que se pretende fazer qualquer tipo de estudo ou levantamento é muito importante para o fotointérprete, durante as etapas de fotointerpretação. Por exemplo, na agricultura o fotointérprete deve adquirir o conhecimento sobre: tamanho das lavouras (relacionado com a resolução espacial), fases do desenvolvimento vegetativo da cultura (calendário agrícola), topografia da região, densidade de cultura (densidade média de plantio na região), incidência de pragas e doenças na região, nível tecnológico adotado pela maioria dos agricultores, tipos de solos, etc.

Para finalizar pode-se dizer que trabalhar com produtos de sensoriamento remoto requer o conhecimento de alguns princípios básicos que são inerentes da região, do tipo de alvo, do sensor e dos métodos existentes para extrair qualquer tipo de informações das imagens de satélite.

Capítulo 13

Interpretação visual de dados orbitais

A interpretação visual de imagens orbitais ou fotointerpretação consiste na extração de informações a respeito dos alvos da superfície terrestre, com base nas suas respostas espectrais. Os produtos de satélites utilizados, para realizar a interpretação visual, geralmente são na forma analógica, ou seja, em papel fotográfico. Os dados espectrais registradas pelos sensores remotos a bordo de satélites, após serem transmitidas para estações terrenas, são processados e transformados num produto fotográfico, chamado de imagem.

Com a evolução da informática surgiram impressoras digitais (“plotters”) capazes de reproduzir fielmente as diferentes cores ou tons de cinza dos dados trabalhados no computador, isto é, realce de imagem de contraste, filtragem, etc. Com isto, é possível imprimir os dados digitais num papel e, então, realizar a interpretação visual como foi discutido para as fotografias, no capítulo 11. Os produtos obtidos a partir de uma impressora (“ploter”) apresentam algumas vantagens em relação a um produto analógico tradicional, em pelo menos três aspectos:

- Permite obter um produto com flexibilidade no estabelecimento da escala de trabalho desejada, ao passo que os produtos analógicos tradicionais (foto aéreas) possuem escalas definidas. No caso dos produtos analógicos, feitos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, as seguintes escalas são oferecidas 1: 1.000.000, 1:500.000, 1: 250.000 , 1:100.000 e 1: 50.000.

- Permite imprimir a somente a área de interesse. Por exemplo, a área de um município, ou uma região administrativa.

- Permite realizar contraste espectral dos alvos da superfície terrestre e associar as três cores primárias (azul, verde e vermelho) a quaisquer três bandas espectrais disponíveis, ao passo que nos produtos analógicos, as cores e o contraste, uma vez definidos não podem ser mais modificados.

Por outro lado, a desvantagem deste procedimento em relação aos produtos analógicos reside no fato de ser necessário dispor de computadores habilitados com aplicativos capazes de ler os dados digitais e de impressoras específicas (“plotters”) para imprimir os dados manipulados no computador.

Além das características de fotointerpretação vistas anteriormente e dos fatores relacionados aos dados de satélites, o fotointérprete deve utilizar outros tipos de dados auxiliares (materiais colaterais) bem como, algumas regras básicas no preparo do material que irá conter os resultados da fotointerpretação, estabelecimento do método de interpretação e, na medida do possível, o uso de equipamentos especiais, tais como ampliadores (e.x. Lupas, o Procon, etc).

13.1 Análise do Material Colateral

Material colateral é tudo aquilo que pode contribuir direta ou indiretamente para melhorar os resultados da fotointerpretação. O tipo de material colateral depende da área de interesse do especialista. No caso de levantamento e inventário de áreas agrícolas, o material colateral pode ser agrupado em três categorias: ambiental, agronômico e estatístico.

Quanto aos fatores ambientais em geral, o fotointérprete necessita obter informações sobre: clima, tipo de solo, forma de relevo, vegetação, etc. O clima dá, ao fotointérprete, uma idéia do tipo de cultura agrícola da região. Determinadas culturas, como a cana-de-açúcar e o café são culturas típicas de climas mais quentes.

Geralmente, o tipo de solo dá uma boa idéia sobre sua contribuição no comportamento espectral de dosséis agrícolas, principalmente, no início do crescimento vegetativo das culturas e na fase de senescência. Por exemplo, solos vermelhos com altos teores de óxidos de ferro ou de matéria orgânica, são solos que refletem pouca radiação na região espectral do infravermelho próximo, enquanto que solos claros (mais arenosos) refletem muita radiação na região do visível do espectro eletromagnético.

A forma do relevo é outro parâmetro importante e que deve ser levado em consideração, ao se fazer uma interpretação de imagens de satélite. O relevo, em grande parte, traduz as práticas agrícolas adotadas na região. Evidentemente, que não é só o relevo a causa da adoção ou não de uma determinada prática de cultivo, todavia, é um fator importante e pode, às vezes, ser limitante.

A localização de usinas e destilarias serve para auxiliar o fotointérprete a identificar áreas próximas a estas unidades. Por exemplo, no inventário de cana-de-açúcar a presença de usinas e destilarias de álcool servem como parâmetros de decisão na separabilidade desta cultura com outras que são cultivadas na região. Geralmente, próximo às usinas o solo é, predominantemente, ocupado com a cultura da cana-de-açúcar.

Outro exemplo bastante interessante é o caso da utilização da presença de barragem para o mapeamento de áreas ocupadas com arroz irrigado por inundação onde a água é levada até a lavoura por gravidade (sem o recurso de bombas). Geralmente, nos locais onde se pratica este tipo de irrigação, também, são cultivadas outras culturas de verão, na forma de sequeiro. Um dos critérios utilizados para separar áreas de arroz irrigado de outras culturas de sequeiro é a localização dos talhões em relação à barragem. Áreas a montante da barragem geralmente são ocupadas por culturas de sequeiro, pela dificuldade que se tem em irrigar essas áreas. Áreas a jusante da barragem são muito provavelmente ocupadas com arroz irrigado porque as condições de declividade do solo são bastante favoráveis para esse tipo de irrigação.

As informações pertinentes à categoria agronômica estão relacionadas ao calendário agrícola da região, práticas agrícolas adotadas, variedades plantadas, extensão dos talhões e distribuição espacial das lavouras.

Das informações agronômicas enumeradas no parágrafo anterior, algumas são mais diretamente relacionadas à seleção do tipo de produto a ser utilizado (imagens de satélites ou fotografias aéreas), outras estão mais diretamente ligadas com a época de aquisição das imagens e outras, ainda, à escala de trabalho.

Informações sobre o calendário agrícola da região, é um parâmetro fundamental na escolha ou seleção das datas ideais para se fazer um inventário agrícola. Por exemplo, para cultivos de verão, sabe-se que o período do ciclo das culturas vai de outubro a março. Entretanto, o preparo do solo e o plantio das culturas, na maioria das vezes, demandam um período de tempo muito longo, dentro de uma mesma região, ou seja, não há uma data específica para que todos agricultores preparem o solo e plantem suas culturas. Com isso, não existe também uma data ideal de passagem do satélite para que todas as culturas sejam espectralmente identificadas e individualizadas nas imagens. Essa é uma das razões que contribui para que uma mesma cultura possa apresentar diferentes comportamentos espectrais nas imagens de satélites numa determinada data. Como não é possível obter uma data ideal

para o mapeio de todas culturas agrícolas, numa dada região, o calendário agrícola auxilia muito a decidir na escolha da melhor data de passagem do satélite, onde se espera que a maioria das culturas plantadas possa ser identificada.

A extensão dos talhões é importante na decisão do tipo de produto que se deve utilizar no inventário das culturas. De modo geral, esse é um fator limitante no uso de dados de satélites, devido à resolução espacial do sistema sensor. Se na área de interesse as culturas agrícolas forem cultivadas em talhões muito pequenos, com área pouco mais do que o elemento de resolução do sensor ("pixel"), certamente o erro de identificação e mapeamento dessas culturas será muito alto, devido à dificuldade de identificar e delimitar essas áreas. Entretanto, vale lembrar que se os talhões são próximos uns dos outros, a identificação e delimitação tornam-se menos problemáticas, porque o somatório de todos eles resulta numa área expressiva nas imagens do satélite. Note bem, nessa situação é possível mapear um conjunto de áreas, sem no entanto pensar na individualização de cada uma delas. Recentemente, com o lançamento de satélites com sistemas sensores de alta resolução espacial, como é o caso do IKONOS, a individualização dessas áreas torna-se muito mais fácil, porque o sensor tem uma resolução espacial de 1m². Por outro lado, na eventualidade da existência de muitos talhões pequenos, porém com distribuição espacial dispersa é aconselhável o uso de fotografias aéreas no lugar de imagens de satélites.

Outro tipo de informação muito útil e que trará grandes contribuições no uso de imagens de satélites, para inventário agrícola, são os dados estatísticos sobre as culturas na área de estudo. Dados estatísticos como: área plantada com determinada cultura, produtividade média da região; nível de manejo adotado na região; produção das principais culturas agrícolas, são informações relevantes porque servem como parâmetro de tomada de decisão para o analista durante a interpretação.

Para obter as informações estatísticas o analista pode lançar mão de dados do censo agrícola, que é realizado periodicamente pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Além do censo, há outros tipos de estatísticas que são coletadas anualmente pelo IBGE, como o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA, Produção Agrícola Municipal – PAM e cadastros, realizados pela Empresa de Assistência Técnicas (EMATER) estaduais, pela Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI), entre outras. É importante ressaltar que estas informações são um indicativo valioso que o analista utiliza como base para realizar a fotointerpretação. A confiabilidade dos dados da interpretação dependerá de estudos estatísticos os quais veremos mais adiante, neste capítulo.

13.2 Preparo do Material

Embora a interpretação visual seja um processo relativamente simples, pois consiste em identificar e delimitar os diferentes alvos da superfície terrestre nas imagens de satélites, com base em seus comportamentos espectrais, a introdução de certos atributos cartográficos e de pontos de controle existentes nas áreas é fundamental por dois motivos básicos: melhora a forma de apresentação e auxilia o fotointérprete na tomada de decisão, quanto aos temas fotointerpretados.

A área compreendida numa imagem de satélite não é uma unidade referencial, para fins cartográficos ou estatísticos. Desta forma, os resultados da interpretação visual devem ser expressos numa unidade cartográfica conhecida e aceita pela comunidade de modo geral. Assim, é aconselhável, antes de realizar a fotointerpretação, transcrever os limites para o papel sobreposto à imagem ("overlay"). a) das cartas topográficas necessárias para abranger a área da imagem; b) dos municípios, estados e da federação contidos na cena, quando for o caso. Além disso, deve-se traçar rede de drenagem, as principais estradas e a localização de pontos de controle como: usinas, destilaria, barragens, etc.

13.3 Estabelecimento de Método de Interpretação

Uma vez feita a análise do material colateral e preparado o material básico (overlay), a etapa seguinte consiste em delimitar, sobre o "overlay", os diferentes padrões espectrais observados nas imagens, quer sejam produtos analógicos, ou resultantes de plotagem dos dados digitais em papel, como foi comentado no início deste capítulo. Esta delimitação nada mais é do que o agrupamento das feições da imagem com mesmas características espectrais. O resultado final desta interpretação preliminar é um mapa contendo a distribuição espacial dos diferentes alvos, em função das diferentes respostas espectrais, apresentadas em tons de cinza ou cores nas imagens de satélites.

Feita esta fotointerpretação preliminar, alguns talhões das diferentes classes temáticas contidas no mapa, são selecionados para serem identificados no campo. Em outras palavras, reconhecer no campo o tipo de alvo selecionado para ser visitado no campo. Estes alvos servirão como treinamento para o fotointérprete rotular o restante dos alvos que foram individualizados na interpretação preliminar. Por essa razão, a escolha desses alvos deve ser feita criteriosamente, para que todas as classes temáticas contidas no mapa preliminar sejam visitadas no campo.

Após a realização do trabalho de campo, é feita uma ré-interpretação das imagens, para dirimir dúvidas de fotointerpretação e rotular cada padrão espectral a um tipo de ocupação do solo, com base no conhecimento de campo. Note-se que esta abordagem de interpretação leva em conta que o analista não conhece previamente o campo. O resultado final é um mapa temático, que poderá ser empregado para cálculo de área ou outras finalidades.

Quando o trabalho de fotointerpretação é realizado por uma equipe de fotointérpretes heterogênea, quanto ao conhecimento das técnicas de sensoriamento remoto, é aconselhável estabelecer um procedimento metodológico de interpretação, que possa ser utilizado por todos os elementos da equipe, de maneira a padronizar os resultados obtidos. Nesta situação, pode-se adotar dois procedimentos ou métodos de fotointerpretação, ou seja: método comparativo e método sistemático.

O método comparativo consiste em uma interpretação dos dados de satélite feita com base numa chave de interpretação, elaborada em função dos diferentes níveis de cinza ou cores (imagens coloridas), observados nas imagens. Essas chaves de interpretação podem ser do tipo seletiva ou eliminatória.

13.3.1 – Chave de Interpretação pelo Método Seletivo

A chave de interpretação do tipo seletiva é aquela na qual os alvos de ocupação do solo, que não interessam ao fotointérprete, não são individualizados na interpretação, isto é, agrupam-se todas as feições contidas na imagem que apresentam níveis de cinza ou cores diferentes da classe de interesse em uma única classe temática. Geralmente, a classe resultante desse agrupamento recebe a denominação de "outros". Por exemplo, se o interesse do fotointérprete é obter um mapa contendo a distribuição espacial das áreas de pastagem e de culturas agrícolas numa determinada região, as outras classes de ocupação do solo como: matas, represas e lagos, cidades, etc. constituirão de uma única classe de ocupação do solo. No final o mapa terá informações de apenas três classes de ocupação do solo, ou seja, a classe "outros" e das classes de pastagem e culturas agrícolas.

13.3.2 – Chave de Interpretação pelo Método Eliminatório

A chave de interpretação do tipo eliminatória tem uma conotação um pouco diferente da seletiva. Neste caso, os alvos que poderão apresentar respostas espectrais semelhantes ao tema de interesse, numa determinada data de passagem do satélite, são mapeados em outras datas onde eles apresentam comportamento espectral diferente do alvo de interesse. Por exemplo, imagine uma situação em que se quer mapear áreas irrigadas por inundação em locais onde há presença de áreas alagadas. Como as áreas alagadas e as áreas irrigadas apresentam o mesmo comportamento espectral numa determinada

época do ano, por estarem ambas inundadas, deve-se elaborar uma chave de interpretação levando em conta o critério multitemporal, em que as áreas alagadas são interpretadas num período antes do preparo do solo.

Na Tabela 13.1 é mostrada uma chave de interpretação do tipo eliminatória, que foi elaborada para o mapeamento de cana-de-açúcar no ano de 1979, no Estado de São Paulo, utilizando imagens do MSS/Landsat, nas bandas 3 e 4, em duas épocas distintas.

Esta chave de interpretação foi assim desenvolvida, porque naquela época mata natural e corpos d'água (lagoa, açudes, etc) apresentavam comportamento espectral semelhante à classe cana-de-açúcar, devido à baixa resolução espacial do sensor MSS, fato este que não se verifica, hoje em dia, nos dados coletados pelo sensor TM do Landsat-5 e 4, devido a melhor resolução espacial e espectral dos novos sensores em relação ao MSS. De qualquer forma, a interpretação desta chave é feita da seguinte maneira:

Tabela 13.1– Chave de interpretação elaborada para mapeamento de cana-de-açúcar através de imagens do Landsat, nas bandas MSS3 e MSS4 para o ano de 1979

FINALIDADE	MAPEADOR CORPO D'ÁGUA E MATA			MAPEAMENTO DE ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR				
	Primeira data			Segunda data		Primeira data		
BANDA	MSS-3	MSS-4		MSS-4		MSS-4		
Nível de cinza	Escuro	Escuro	Médio	Claro	Escuro	Claro	Escuro	Claro
Situação Simples	a	b	c	d	e	f	g	H
Situação Combinada	–	ab	ac	–	–	df	dg	Eh
Tema	–	Corpo d'água	Mata	–	–	Cana adulta	Cana nova	Cana colhida
Legenda	–	Colorir de azul	Colorir de preto	–	–	Colorir de preto		

FONTE: Mendonça et al. (1981)

1) Nas imagens da primeira data, quando o alvo apresentava tons de cinza escuro na banda MSS-5 e escuro na banda TMSS-7 (situação *ab*) a área era mapeada como sendo corpo d'água. Sabe-se que a curva de reflectância da água é muito pequena na banda MSS-5 e, praticamente, zero na banda MSS-7.

2) Ainda nas imagens da primeira data, se o alvo apresentasse uma tonalidade de cinza escuro na banda MSS-5 e médio na banda MSS-7 (situação *ac*) era classificado como sendo mata. A mata natural reflete bastante a energia na região do infravermelho próximo. No entanto, devido ao efeito de sombreamento das árvores maiores sobre as menores, a energia refletida pelo dossel da mata é diferenciada em função da maior ou menor quantidade de sombra. Este fato faz com que a mata natural apresente uma tonalidade de cinza médio.

3) Sobrepondo as imagens da banda MSS-7 da segunda data com as imagens da primeira data, os resultados da fotointerpretação foram baseados nos seguintes critérios:

- Se o alvo apresentava tons de cinza claro nas imagens da banda MSS-7 da segunda data e perma-

necia claro na primeira data (situação *df*), o tema era interpretado como sendo cana de açúcar adulta.

- Se o alvo apresentava tons de cinza claro na imagem MSS-7 da segunda data e escuro na primeira data (situação *dg*), a área era interpretada como sendo cana nova (rebrotada ou cana plantada), solo exposto (tom de cinza escuro) e vegetação (tom de cinza claro).

- Se o alvo apresentava tons de cinza escuro na imagem MSS-7 da segunda data e claro na primeira data (situação *eh*), a área era interpretada como sendo cana colhida.

Com esta chave de interpretação foi possível individualizar cinco classes de ocupação do solo, sendo elas: mata, corpos d'água, cana adulta, cana nova e cana colhida. Porém, o uso do método das chaves de interpretação apresenta vantagens e desvantagens, indicadas a seguir:

• VANTAGEM

Permite ao fotointérprete iniciante organizar as informações presentes na imagem de modo a melhorar a eficiência do mapeamento.

Esta chave de interpretação pode ser adaptada para sensores de diferentes satélites.

• DESVANTAGENS

1) Suprime o esforço criativo levando o fotointérprete a uma atividade repetitiva, isto é, realizar a fotointerpretação baseado apenas em tons de cinza ou cores.

2) Não tem aplicabilidade ampla, isto é, uma chave que é desenvolvida para uma região pode não ser adequada para outra.

3) Pode ocorrer erro de identificação quando alvos diferentes apresentam mesma estrutura e/ou forma muito semelhante.

13.3.3 –Interpretação pelo Método Sistemático

A interpretação visual de dados de satélite, através do método sistemático, consiste em aplicar uma metodologia numa seqüência lógica de etapa de fotointerpretação isto é: fotoleitura, fotoanálise e fotointerpretação. Além disso, pode-se adotar alguns processos durante a fotointerpretação que podem auxiliar o fotointérprete a obter um mapa temático de ocupação da terra com melhor precisão e exatidão de mapeamento. Assim, a interpretação pode ser caracterizada como:

a) Metódica – interpretar um tema de cada vez. Por exemplo, toda área ocupada com pastagem.

b) Do geral para o particular – neste caso, cada classe pode conter várias subclasses. Por exemplo, a classe cana de açúcar pode ser composta das subclasses cana adulta, cana colhida e cana nova.

c) Do conhecido para o desconhecido – faz o mapeamento das classes conhecidas, como mata ciliar, cidades, barragens, estradas, mata natural, pastagem, etc.

d) Convergência de evidências - neste caso, a interpretação visual é feita com base em certos critérios que evidenciam a presença do alvo que estamos investigando. Por exemplo, se o alvo apresenta um tom de cinza escuro na região do vermelho e claro no infravermelho próximo, o alvo certamente será uma vegetação, uma vez que esse tipo de comportamento espectral é característico de vegetação. Se o talhão apresenta forma regular, com presença de carregadores, pode ser cana-de-açúcar ou reflorestamento. A diferença básica entre os dois temas está na regularidade dos tamanhos dos talhões. Se os talhões não apresentam certa regularidade em termos de área (talhões grandes e pequenos), associados ainda à presença de curvas de níveis e localizados próximos a uma destilaria de álcool, estes talhões têm tudo para ser de cana-de-açúcar. Nota-se que, neste caso, a identificação do tema cana-de-açúcar foi baseada em certas evidências. No exemplo da Figura 13.1 é mostrado uma parte de uma imagem em composição colorida, obtida com o sensor TM do Landsat-5, contendo

áreas irrigadas por pivô central e áreas não irrigadas, no Mato Grosso do Sul. As áreas irrigadas pelo sistema de pivô central são facilmente identificadas porque apresentam formas circulares. Em outras palavras, as evidências do formato circular e do tamanho (80 a 120 ha) levam a identificá-las como sendo áreas irrigadas por pivô central.

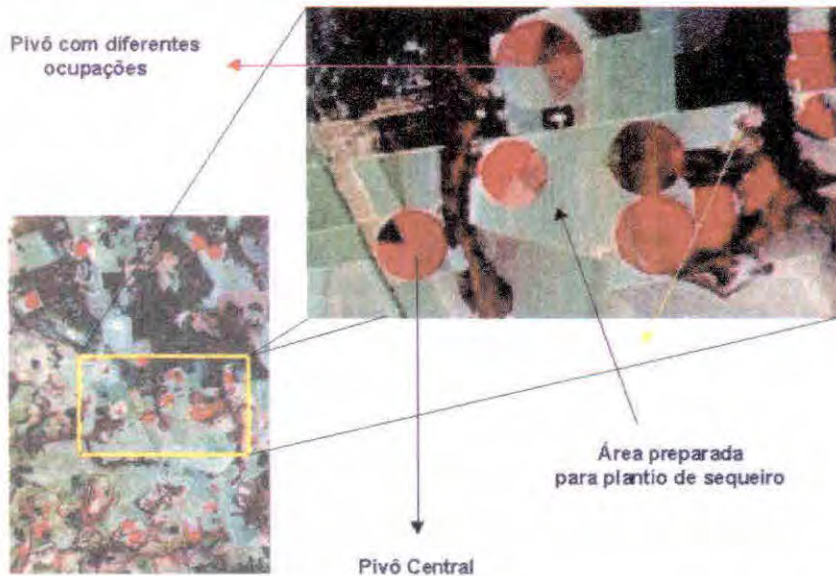


Fig.13.1 – Imagem do sensor TM, em composição colorida, para mostrar áreas irrigadas por pivô central e áreas preparadas para plantio de sequeiro.

e) **Uso de equipamentos especiais** - para facilitar a visualização dos alvos nas imagens de satélites pode-se usar lupas ou qualquer outro equipamento de ampliação.

Após a fotointerpretação é feito o mapa final contendo a distribuição espacial dos diferentes alvos de ocupação do solo. Este mapa pode ser utilizado para diversos fins, até mesmo como referência em estudos envolvendo a classificação de dados digitais. Seja qual for o seu destino, o mapa deve possuir uma confiabilidade estatística aceitável pelo usuário, sobre a qual falaremos a seguir.

13.4 Confiabilidade do Mapeamento

O mapa temático, obtido de interpretação de imagens de satélites, tem como objetivo representar o universo real. Entretanto, é sabido que retratar com fidelidade absoluta qualquer objeto da natureza na forma de desenho, como é o caso dos mapas temáticos, é impossível, devido aos erros introduzidos nas diversas etapas de confecção dos mesmos.

As causas mais comuns que podem levar a erros durante o mapeamento são atribuídas: a) falha na identificação correta das classes temáticas; b) ao fotointérprete; c) à delimitação precisa dos diferentes alvos contidos na cena; d) à escala de trabalho; e) à resolução espacial do sensor; f) ao desenho final do mapa e g) à qualidade do papel usado para confeccionar o mapa.

De modo geral, a qualidade de um mapa temático é avaliada por dois quesitos: precisão e exatidão de mapeamento. Para ilustrar cada um destes quesitos, imaginemos um mapa confeccionado a partir de uma interpretação visual de dados do sensor TM do Landsat, contendo a distribuição espacial de áreas de arroz, café, pastagem e mata natural. Para cada uma dessas classes temáticas é, então, calculado a área.

A precisão deste mapa refere-se ao quanto à área de cada classe reflete a verdade no campo. Por exemplo, suponhamos que a área de arroz, obtida através da interpretação visual, foi de 450 ha, no campo porém a área realmente ocupada com esta cultura foi de 480 ha. A precisão do mapeamento para o arroz é de 93,7%, aproximadamente. Observa-se que esse resultado indica que o mapa apresen-

ta uma precisão de área de arroz muito boa. Entretanto, não diz se as áreas fotointerpretadas correspondem exatamente à realidade no campo, ou seja, o fotointérprete pode ter mapeado outras áreas, que apresentavam semelhanças de comportamento espectral da cultura do arroz, como sendo áreas orizícolas, quando na verdade não eram.

Por outro lado, a exatidão de mapeamento é um número (geralmente em porcentagem) que avalia o posicionamento da distribuição espacial de cada uma das classes que foram mapeadas, ou seja, é possível dizer se uma área que foi mapeada como sendo de arroz é de fato uma área ocupada com arroz no campo. Veja que neste caso, a preocupação é mais voltada ao posicionamento da área e não com o valor da área, como no caso da precisão. Em geral, a causa mais comum de erros na exatidão do mapa, está associado à identificação das classes de interesse nas imagens de satélite.

Estes dois parâmetros estatísticos de avaliação do mapeamento conferem a um mapa como sendo preciso e exato ou preciso e pouco exato ou ainda pouco preciso e exato.

Os erros de mapeamento que estão relacionados ao fotointérprete são devido a uma série de fatores, tais como psíquicos, estado emocional, estresse e, até mesmo falta de conhecimento das técnicas de fotointerpretação e dos cuidados que devem ser tomados com as imagens durante a interpretação. Este tipo de erro pode ser, em parte controlado bastando para isso, observar os fatores mencionados acima.

A escala de trabalho geralmente é um fator da imagem que propicia erros durante a fase de mapeamento. Quanto maior for o denominador da escala, menor será a representação espacial dos alvos nos dados de satélite. Essa ampliação dos alvos em função da escala de trabalho é bem ilustrada na Figura 12.6 e 12.7 do capítulo 12.

O tamanho, com que os alvos são apresentados nas imagens de satélites, é muito importante porque está ligado a outras fontes de erros, por exemplo, a facilidade de identificação e mapeamento dos diversos alvos numa imagem de satélite será tanto mais precisa quanto maior for a escala de trabalho (menor o denominador da escala). O erro devido à espessura da linha que separa dois temas diferentes, também diminui com o aumento da escala de trabalho. Uma linha de espessura de 1,0 mm equivale, na escala de trabalho de 1: 250.000, a 250 m no terreno, enquanto que na escala 1:50.000 essa mesma linha corresponde a 50 m no terreno. Por essa razão, é necessário observar com certa frequência a espessura da linha. Além disso, o erro cometido no traçado dos limites de cada talhão diminui com o aumento da escala de trabalho.

O erro inerente do processo de confecção do mapa (desenhista) está muito relacionado com o desenho das linhas que individualizam os diferentes alvos da superfície terrestre. Geralmente, este trabalho é uma cópia do desenho feito durante a fotointerpretação que pode ser através de desenho a mão livre ou digitalização. Neste procedimento ocorre, com frequência, distorções no traçado das linhas. No entanto, é um tipo de erro que também pode ser minimizado.

Os erros introduzidos no mapa devido à resolução do sensor (tamanho do "pixel") são de difícil controle porque foge de qualquer esforço do fotointérprete no sentido de minimizá-lo. Como foi discutido anteriormente, o "pixel" representa uma reflectância média, integrada de todos os alvos contidos numa área mínima no terreno, que no caso do sensor TM do Landsat, representa uma área de 30m x 30m (900 m²). Além disso, a reflectância expressa no "pixel" tende ter um valor que representa o alvo de maior brilho ou de maior ocupação. Por exemplo, um "pixel" de borda, que representa um determinado alvo, pode conter outros tipos de alvos de menor expressão. Nesta situação o erro é inevitável, mas que pode ser diminuído utilizando sensores com melhores resoluções espaciais, como o pancromático do SPOT, cuja resolução espacial é de 10 m x 10 m (100 m²) ou imagens do IKONOS com resolução espacial de 4m x 4m (16 m²).

Para que seja verdadeira a afirmação de que o mapa temático representa o universo real, ele deve ter uma confiabilidade estatística tanto em precisão quanto na exatidão do mapeamento, que seja aceita pela comunidade.

Uma das formas empregadas para avaliar a precisão de mapeamento, quando se utilizam ima-

gens de satélites, é determinar os erros de inclusão (EI) e omissão (EO), que são determinados em função da área de cada classe, calculada no mapa temático, e a área real no campo utilizando a seguinte expressão:

$$EI(\%) \text{ e } EO(\%) = \frac{\text{área da classe estimada no mapa}}{\text{área real no campo}} \times 100 \quad (13.1)$$

Quando a área estimada no mapa temático for maior do que a área real no campo, temos uma situação de erro de inclusão. Caso contrário, tem-se uma situação de erro de omissão.

Para o cálculo dos erros de inclusão e omissão, segundo a Equação 13.1, é necessário obter a informação, no campo ou através de fotografias aéreas, que servem como verdade terrestre. O grande problema apresentado neste tipo de avaliação é obter informações de campo que tenham uma confiabilidade conhecida. Na agricultura por exemplo, as informações sobre áreas plantadas com culturas agrícolas, na maioria das vezes, são obtidas através de métodos subjetivos, sem nenhuma confiabilidade estatística estabelecida. Para contornar este problema, os mapas temáticos são avaliados em termos de exatidão de mapeamento, que baseia numa amostragem de área, para ser visitada no campo e, a partir dessas informações, estimar a exatidão do mapa.

A exatidão de mapeamento depende de vários fatores, alguns deles já descritos anteriormente e outros relacionados ao esquema de amostragem; tamanho das unidades de amostragem; tamanho da amostra; e o modelo utilizado para estimar a exatidão do mapeamento.

13.4.1 – Amostragem

A seleção de um esquema apropriado de amostragem, para o cálculo da exatidão do mapeamento, é crítica, pois é difícil gerar uma matriz de erro que seja representativa de todas as classes fotointerpretadas na imagem. Congalton (1988), utilizando resultados de fotointerpretação de dados do MSS/Landsat, comparou diversos esquemas de amostragem de área para determinar exatidão de mapeamento de diferentes coberturas do solo. Os esquemas de amostragens utilizados foram: amostragem aleatória simples (AAS), amostragem estratificada (AS), amostragem estratificada não alinhada (AESNA), amostragem em "clusters" e amostragem aleatória estratificada (AE). Neste estudo, o autor observou que a amostragem aleatória simples (AAS) sempre forneceu estimativa adequada dos parâmetros da população. No caso de áreas ocupadas com culturas agrícolas e pastagem o uso do AS e AESNA superestimou os parâmetros da população, enquanto que o AC teve um desempenho considerado como bom.

Apesar das conveniências estatísticas da AAS (mais fácil de construir o delineamento e aplicar estimadores), segundo Congalton (1991), esse esquema tende a subamostrar classes de pequenas superfícies (talhões com pequena área). Por esta razão, recomenda-se a amostragem aleatória estratificada, com um mínimo de amostra para cada categoria de uso do solo. Hay (1979) propôs a estratificação por categoria, que permite a amostragem de cada categoria de uso do solo separadamente, com o intuito de que todas as classes mapeadas estejam igualmente representadas. No Brasil, Mendonça et al. (1981) obtiveram bons resultados na exatidão de mapeamento da cana-de-açúcar, utilizando o método de amostragem aleatória simples.

Qualquer que seja o esquema de amostragem adotado, é necessário estabelecer um procedimento padronizado para medida e comparação da exatidão de mapeamento. Gong e Howarth (1990) avaliaram diferentes estratégias de amostragem para a determinação do mapeamento temático em mapas gerados a partir de imagens do HRV/SPOT. Neste estudo, os autores observaram que as técnicas de amostragem AAS, AE e AESNA produziram resultados de exatidão muito diferentes quando medidos através do coeficiente Kappa.

13.4.2 - Unidade de Amostragem

As unidades de amostragem utilizadas para a avaliação da exatidão de mapeamento incluem pontos, transectos e áreas.

Até alguns anos atrás, o uso de pontos para obter informações de ocupação do solo, para estimar a exatidão de mapeamento, era evitado porque, na prática, a localização destes pontos no terreno era muito difícil, devido à incerteza de posicionamento do ponto. O que é encontrado com muita frequência na literatura é a recomendação da área, como unidade de amostragem. Neste sentido, Aronoff (1985), comenta que uma unidade de amostragem do tamanho de um "pixel" é muito reduzida para ser localizada com exatidão no terreno. O autor comenta ainda que o tamanho mais adequado da unidade de amostragem deve ser tão grande quanto a mínima unidade mapeada. Dependendo do tamanho da unidade de amostragem, várias classes de uso do solo podem estar inseridas numa única unidade. Nesta situação, Aronoff (1985) sugere que se utilize uma regra que atribua à unidade de amostragem a classe com maior área.

Com o uso cada vez maior do Sistema de Posicionamento Global (GPS), que fornecem posições com erro inferior a 10m, a preocupação que se tinha há pouco tempo, em relação ao posicionamento correto do ponto no terreno, deixou de ter sentido. A possibilidade de se usar, cada vez mais, o GPS para orientação no campo, trás a luz da verdade, a necessidade que tem em reestruturar o desenho das unidades de amostragem a serem empregadas na coleta de dados de campo para avaliação dos mapas temáticos provenientes de dados de satélites.

13.4.3 - Tamanho da Amostra

O tamanho da amostra é um outro parâmetro que deve ser levado em consideração quando se pretende estabelecer um esquema de amostragem. O tamanho da amostra, em geral, deve ser estabelecido em função de dois critérios: um estatístico e outro econômico.

Do ponto de vista estatístico, a amostra deve ser o suficientemente grande para garantir uma confiabilidade nos resultados obtidos. Entretanto, do ponto de vista econômico, a amostra deve ser de um tamanho tal que não inviabilize a sua utilização.

Hay (1979) estabeleceu que uma amostra de área para ser utilizada na estimativa da exatidão de mapeamento deveria conter um número mínimo de 50 unidades, para cada categoria de uso da terra, e de 75 a 100 unidades, quando a área fosse grande ou o mapeamento tivesse um número maior que doze categorias.

Fitzpatrick-Lins (1981) estabeleceu um método para o cálculo inicial do tamanho da amostra, o qual é descrito na Equação 10.2.

$$n = \frac{(Z\alpha_{/2})^2 \cdot p_0 (1 - p_0)}{d^2} \quad (13.2)$$

onde, $Z\alpha_{/2}$ é o valor da função de distribuição acumulada da normal padrão relativo a uma área igual a $1 - \alpha/2$; p_0 é a exatidão de mapeamento mínima desejada para o mapa, e d é o erro máximo de estimativa desejado.

Rosenfield et al. (1982) observaram que a equação proposta por Fitzpatrick-Lins (1981) não considera a correção de continuidade para a aproximação da distribuição binomial. Desta forma, os autores propuseram uma outra abordagem, expressa pela Equação 10.3, para o cálculo do tamanho da amostra.

$$n = Z\alpha_{/2} \sqrt{p_0(1 - p_0)/n} + 1/2n \quad (13.3)$$

Existe ainda uma possibilidade de definir o tamanho das amostras através do estabelecimento de uma porcentagem do tamanho da área estudada. Rocha (1992), citado por Ippoliti-Ramiló (1999), concluiu que para classificações digitais supervisionadas e não supervisionadas, os tamanhos adequados foram 1,25% e 1,75% da área total, respectivamente.

13.4.4 - Validação da Exatidão do Mapeamento

Os métodos usados para estimar a exatidão de mapeamento têm como ponto de partida a construção de uma matriz de erro. Esta matriz apresenta a distribuição de porcentagem de “pixels” classificados corretamente e erroneamente (Congalton 1991). Hay (1988) comenta que o uso da matriz de erro é útil em pelo menos três objetivos: a) oferece dados que permitem o ajuste das áreas das classes obtidas por algum tipo de classificação; b) cálculo de parâmetros de exatidão geral da classificação e c) identificação de erros específicos que afetam cada uma das categorias.

Ippoliti-Ramiló (1999) comenta que a estatística mais simples derivada da matriz de erro é a exatidão geral (P_0) que é calculada segundo a expressão:

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ii}}{N} \quad (13.4)$$

onde, N é o número total de unidades amostrais, n_{ii} são os elementos da diagonal principal (número de pixels corretamente classificados) e m é o número de categorias presentes na matriz de erro. i e j são as linhas e colunas, respectivamente.

A variância ($\sigma_{p_0}^2$) é dada por:

$$\sigma^2 = \frac{p_0(1 - p_0)}{N} \quad (13.5)$$

Segundo Story e Congalton (1986), a exatidão geral pode ser expressa através dos erros de omissão e inclusão. Neste caso, estes erros são estimados em função da amostra de área, diferindo-se daqueles calculados para avaliar a precisão de mapeamento.

Através da matriz de erro é também possível utilizar técnicas de análise multivariada para determinar a concordância do mapeamento com a verdade de campo. Segundo Congalton e Mead (1983), essas técnicas são apropriadas pois os dados são de natureza discreta (não contínuos) e encontram-se distribuídos multinomialmente. Neste sentido, a estatística Kappa é um método muito utilizado para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático, obtido a partir da interpretação visual de imagens de satélite. A grande vantagem do uso da estatística Kappa é que no cálculo do coeficiente Kappa incluem-se todos os elementos da matriz de erro e não somente os elementos da diagonal principal, como no caso da exatidão geral. Para a determinação do valor Kappa e da sua variância emprega-se as seguintes equações:

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad (13.6)$$

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ij}}{N} \quad (13.7)$$

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^M n_{i+} n_{+i}}{N^2} \quad (13.8)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{P_o(1 - P_o)}{N(1 - P_c)^2} \quad (13.9)$$

onde, **P_o** é a exatidão geral, **P_c** é a proporção de unidades que concordam por casualidade; **M** é o número de classes presentes na matriz de erro; **n_{ij}** representa o número de observações na linha **i** e coluna **j**; **n_{i+}** e **n_{+j}** são os totais marginais da linha **i** e da coluna **j**, respectivamente e **N** refere-se ao número total de unidades amostrais contempladas pela matriz.

O valor da estatística Kappa, determinado através da Equação 13.6, é comparado aos valores contidos na Tabela 13.2, desenvolvida por Landis e Koch (1977). Na realidade essa tabela foi desenvolvida para analisar resultados de análise de diagnósticos clínicos. Entretanto, ela tem sido referênciada para classificar mapas resultantes da utilização de imagens de sensoriamento remoto, dentro de certas restrições, mas que tem dado bons resultados.

Tabela 13.2– Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa

Valor de Kappa	Qualidade do mapa temático
< 0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito boa
0,80 – 1,00	Excelente

Adaptada de Lindis e Koch (1977, p.65)

Nota-se que a validação da exatidão de mapeamento, através da estatística Kappa, não leva em consideração a probabilidade *a priori* da ocorrência de cada classe. Neste sentido, Ma e Redmond (1995) propuseram uma outra metodologia, denominada pelos autores de Tau, para avaliar a exatidão do mapeamento quando as probabilidades de ocorrência das classes de ocupação do solo são diferentes. O cálculo de Tau (T) e de sua variância são expressos pelas seguintes fórmulas:

$$T = \frac{P_o - 1/M}{1 - 1/M} \quad (13.10)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{P_o (1 - P_c)}{N(1 - 1/M)^2} \quad (13.11)$$

onde:

P_o = é a proporção de unidades que concordam em termos de ocupação no mapa e no terreno.

P_c = é a proporção de unidade amostradas que concordam por casualidade.

M = é o número de classes presentes na matriz de erro.

N = é o número total de unidade amostrais contidas na área.

Ginevan (1979) propôs um outro método estatístico, baseado num ramo da estatística denominado de Amostragem por Nível de Aceitação, comumente utilizado em controle de qualidade de produtos industrializados, mas que também tem sido utilizado em mapas temáticos oriundos de técnicas de sensoriamento remoto. Essa abordagem estatística requer um mínimo de exatidão com um mínimo de concordância de 85% e 95%, respectivamente. Contudo, um dos problemas do uso da abordagem de Ginevan (1979) é determinar o número ótimo (n) de unidades de amostragem que deve ser visitado no campo, e o número permissível de pontos (X) erroneamente classificados nesta amostra.

Pelo procedimento de Ginevan (1979), a exatidão de mapeamento é estimada com base em dois tipos de risco, denominados de **risco do consumidor** e **risco do produtor**. O risco do consumidor refere-se à probabilidade de aceitar um mapa que está fora dos padrões de exatidão estabelecidos, e o risco do produtor expressa a probabilidade de um mapa ser rejeitado quando está dentro das especificações de exatidão. Os valores dessas duas variáveis são calculados pelas seguintes equações:

$$\text{Conrisc} = \sum_{y=0}^x \frac{N!}{Y!(N - Y)!} Q_L^{N-Y} (1 - Q_L)^Y \quad (13.12)$$

$$\text{Prodrisc} = \sum_{y=x+1}^x \frac{N!}{Y!(N - Y)!} Q_H^{N-Y} (1 - Q_H)^Y \quad (13.13)$$

onde,

Conrisc é o risco do consumidor, Prodrisc é o risco do produtor, Q_L é o mínimo de exatidão requerida pelo consumidor, Q_H representa a seleção de alto nível de exatidão, X é o número permissível de pontos erroneamente classificados, N número de total de unidades amostrais e Y é o número de pontos erroneamente classificados.

De acordo com a Teoria de Decisão Estatística os dois tipos de erros que estão associados à avaliação da exatidão de mapeamento são: **erro do tipo I** e **erro do tipo II**. Assim, pode-se formular duas hipóteses quanto à aceitação da exatidão do mapa.

- rejeita H_o , quando H_o é verdadeiro (erro do tipo I)
- aceita H_o , quando H_o é falso (erro do tipo II)

onde H_o é a exatidão do mapa.

Para as hipóteses formuladas acima associa-se um valor α e β (valores tabelados) que correspondem à probabilidade de incorrer nestes tipos de erros quando se toma uma decisão a partir de um teste de hipótese.

Na confecção de um mapa temático, deve-se estabelecer *a priori* o valor da exatidão mínima aceitável pelo usuário (Q_L), abaixo do qual o mapa será rejeitado com probabilidade de $(1 - \alpha)$. Uma

vez escolhidos os valores de n , α e Q_L , o cálculo do número permissível de pontos erroneamente classificados (X), é dado pelo maior número de X que satisfaça a desigualdade:

$$\text{Conrisc} \leq a \quad (13.14)$$

Desta maneira, tendo calculado X , pode-se calcular a probabilidade β de rejeitar um mapa com uma dada exatidão (Q_H), sendo $Q_H > Q_L$ estabelecido pelo produtor.

Para exemplificar este procedimento, supõe-se que se deseja elaborar um mapa no qual foi estabelecido que $Q_L = 0,85$; $Q_H = 0,90$; $\text{conrisc} = 0,05$ e $\text{prodrisc} = 0,15$, para $\alpha = 0,05$.

Para o cálculo do valor de n (tamanho da amostra) e de X (número máximo de pontos erroneamente classificados), deve-se consultar a Tabela 13.3, desenvolvida por Ginevan (1979). É importante deixar claro que a Tabela 13.3 é parte de uma Tabela maior desenvolvida por Ginevan.

Analisando os números na Tabela 13.3, na coluna de $Q_H = 0,90$ o valor de β correspondente a 0,15 (risco do produtor), encontra-se o número 0,1483 que corresponde ao valor mais próximo de 0,15. Observando ainda os números no sentido horizontal, à esquerda na tabela, encontramos os números $n = 319$ e $X = 37$. Isto indica que a amostra deve conter 319 pontos a serem visitados no campo e o erro máximo de pontos permitidos é de 37.

Tabela 13.3 – Valores ótimos de n , para X variando de 0 – 37, com $a = 0,05$, $Q_L = 0,85$, $\beta = 0,15$ para $Q_H = 0,90$; 0,95 e 0,99.

N	X	Valores de β para		
		$Q_H = 0,90$	$Q_H = 0,95$	$Q_H = 0,99$
19	0	0,8649	0,6226	0,1738
30	1	0,8163	0,4465	0,0361
40	2	0,7772	0,3233	0,0075
50	3	0,7497	0,2396	0,0016
59	4	0,7152	0,1719	0,0003
68	5	0,6859	0,1242	0,0001
–	–	–	–	–
–	–	–	–	–
289	33	0,1821	0,0000	0,0000
296	34	0,1704	0,0000	0,0000
304	35	0,1643	0,0000	0,0000
311	36	0,1537	0,0000	0,0000
319	37	0,1483	0,0000	0,0000
–	–	–	–	–
–	–	–	–	–

Adaptada de Ginevan (1979)

Capítulo 14

Processamento de imagens digitais

A idéia de criar procedimentos computacionais para análise de dados coletados por sistemas sensores surgiu basicamente por duas razões: agilizar as tarefas manuais realizadas durante a interpretação visual (delimitação de áreas, confecção de mapas, cálculo de área, etc) e possibilitar ao analista introduzir outros tipos de informações e cruzá-las com os padrões espectrais, contidos nas imagens, de tal modo a tornar esses padrões mais facilmente identificáveis.

Os primeiros sistemas desenvolvidos para esta finalidade eram voltados, única e exclusivamente, para extração de informações das imagens orbitais. Em outras palavras, não utilizavam nenhum outro tipo de informações complementares, a não ser a experiência e observação do fotointérprete. Neste caso, os sistemas levavam em considerações apenas as mudanças nos padrões espectrais (diferenças nos valores dos níveis de cinza) contidos na área imageada. Além disso, estes sistemas possuíam uma configuração muito simples em relação aos sistemas hoje em dia disponíveis. De modo geral, eram constituídos basicamente por uma leitora de dados (na maioria das vezes gravados em fitas magnéticas de 2400 pés), um disco rígido (geralmente pequeno) para armazenamento dos dados, algoritmos de classificação e um sistema de "plotter" para imprimir os resultados na forma de caracteres. No Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o primeiro sistema destinado a processar dados de satélites foi o "Image One Hundred" – I-100. Era um equipamento que ocupava um espaço físico muito grande e possuía uma memória fixa de aproximadamente um giga byte.

A partir do final da década de 80 o processamento dos dados digitais passou a ser visto dentro de um conceito maior, isto é, associar aos dados de satélites, informações geocodificadas e realizar análises mais complexas, através de manipulação de dados de diversas fontes e da criação de um banco de dados georeferenciado. Assim, o tratamento de dados digitais passou a ser denominado de geoprocessamento, incluindo as técnicas empregadas para o tratamento de imagens digitais, e as técnicas complementares para manipulação de dados de outras fontes e o cruzamento destas informações com aquelas extraídas de dados de satélites.

Esta nova visão, aliada à evolução da informática fez com que os sistemas de processamento e classificação de dados orbitais sofressem substanciais modificações tanto na parte de "hardwares" quanto na de "softwares".

Na parte de "Hardwares", os sistemas ganharam expressivos aumentos na capacidade de armazenamento de dados. Sistemas de processamento de imagens, que antes ocupavam espaços físi-

cos exagerados como o I-100, foram substituídos por equipamentos compactos, como os microcomputadores e as estações de trabalho "Workstation" e com muito mais espaço em disco para armazenamento de dados. As unidades leitoras de dados passaram de discos rígidos para fita "Streamer", chegando atualmente aos CD-ROM. Além disso, os sistemas de processamento de dados digitais, foram desenvolvidos integrados aos sistemas de informações geográficas (SIG), permitindo, assim, introduzir outros tipos de dados como os cartográficos e os cadastrais, para auxiliar o analista na interpretação dos dados orbitais.

Na parte de "softwares" houve também melhorias consideráveis. Foram criadas novas técnicas de classificação e geração de novas fontes de dados a partir dos dados de satélites, como é o caso do algoritmo que restaura imagens com "pixels" de tamanhos diferentes dos originais. Por exemplo, a partir de uma imagem obtida pelo sensor TM do Landsat, com resolução espacial de 30m x 30m é possível gerar outras (restaurar) imagens com resolução menor que 30 m x 30 m. Além disso, criou-se sub-rotinas que permitem maior interação do analista com o computador, no sentido de manipular os resultados de classificação, como é o caso da edição matricial, implementada no Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas – SPRING, aplicativo desenvolvido no INPE.

14.1 Geoprocessamento

O geoprocessamento pode ser entendido como sendo a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação sobre objetos ou fenômenos geograficamente identificados.

O geoprocessamento tem sido empregado numa gama muito grande de aplicações em diversas áreas da Ciência, dentre elas podemos citar: a Cartografia, a Geografia, a Agricultura e Floresta, a Geologia, etc. Além disso, tem contribuído para estudos de planejamento urbano e rural, meios de transportes, comunicações, energia. As ferramentas utilizadas para realizar o Geoprocessamento compõem um conjunto denominado de Sistema de Informação Geográfica (SIG), às vezes chamado de GIS, do Inglês **Geographic Information System**.

No Brasil, a introdução do Geoprocessamento teve início nos anos 80 a partir dos esforços do professor Jorge Xavier da Silva, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). No ano de 1982 veio ao Brasil o Dr. Roger Tomlinson, responsável pela criação do primeiro SIG (*Canadian Geographical Information System*). A vinda do Dr. Roger incentivou o aparecimento de vários grupos de pesquisas, em várias instituições, a desenvolverem SIGs. Segundo Câmara e Medeiros (1996), os principais sistemas criados foram:

a) **SAGA** (*Sistema de Análise Geo-Ambiental*). Desenvolvido pelo grupo de pesquisadores do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geografia da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), sob a orientação do professor Jorge Xavier. O SAGA tem seu forte na capacidade de análise geográfica e vem sendo utilizado com sucesso como veículo de estudos e pesquisas.

b) **MaxiCAD**: Pesquisadores responsáveis pelo setor de informática da empresa de aerolevanteamento AeroSul criaram, em meados dos anos 80, um sistema para automatização de processos cartográficos. Posteriormente, constituíram empresa MaxiDATA e lançaram o MaxiCAD, software largamente utilizado no Brasil, principalmente em aplicações de Mapeamento por Computador. Mais recentemente, o produto dbMapa permitiu a junção de bancos de dados relacionais a arquivos gráficos MaxiCAD, produzindo uma solução para "desktop mapping" para aplicações cadastrais.

c) **SAGRE** (Sistema Automatizado de Gerência da Rede Externa): O Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS (CPqD/TELEBRÁS) iniciou, em 1990, o desenvolvimento do SAGRE, uma extensiva aplicação de Geoprocessamento no setor de telefonia. Construído com base num ambiente de um SIG (VISION) com um banco de dados cliente-servidor (ORACLE), o SAGRE envolve um significativo desenvolvimento e personalização de software.

d) **SITIM SIG e SPRING**: O INPE, em 1984, estabeleceu um grupo específico para desenvolvimento de tecnologia de geoprocessamento e sensoriamento remoto, criando, assim, a Divisão de Processamento de Imagem-DPI).

De 1984 a 1990 a DPI desenvolveu o SITIM (Sistema de Tratamento de Imagens) e o SIG (Sistema de Informações Geográficas), para ambiente PC/DOS, e, a partir de 1991, o SPRING para ambientes UNIX e MS/Windows.

O SITIM/SIG foi suporte de um conjunto significativo de projetos ambientais, podendo citar: (a) o levantamento dos remanescentes da Mata Atlântica Brasileira (cerca de 100 cartas), desenvolvido pela IMAGEM Sensoriamento Remoto, sob contrato do SOS Mata Atlântica; (b) a cartografia fito-ecológica de Fernando de Noronha, realizada pelo NMA/EMBRAPA; (c) o mapeamento das áreas de risco para

plântio para toda a Região Sul do Brasil, para as culturas de milho, trigo e soja, realizado pelo CPAC/EMBRAPA; (d) o estudo das características geológicas da bacia do Recôncavo, através da integração de dados geofísicos, altimétricos e de sensoriamento remoto, conduzido pelo CENPES/Petrobrás. Assad e Sano (1998) apresentam um conjunto significativo de resultados do SITIM/SIGI na área agrícola.

O SPRING unifica o tratamento de imagens de Sensoriamento Remoto (ópticas e microondas), mapas temáticos, mapas cadastrais, redes e modelos numéricos de terreno. A partir de 1997, o SPRING passou a ser distribuído via Internet e pode ser obtido através de "website".

Atualmente, existem representantes brasileiros para praticamente todos os principais sistemas de informação geográfica, disponíveis principalmente nos Estados Unidos e Europa. Na Tabela 14.1 contém informações de alguns SIGs mais conhecidos no mercado, indicando as formas de armazenamento: informações gráficas e/ou alfanuméricas, e o tipo de equipamento necessário (Câmara e Medeiros, 1996). Segundo ainda os autores, todos os softwares abaixo relacionados possuem condições para interligação de dados gráficos com dados alfanuméricos, armazenados em bancos de dados proprietários ou não.

Tabela 14.1– Principais GIS disponíveis no mercado e suas características*

GIS/FABRICANTE	ESTRUTURAS DE DADOS	BANCO DE DADOS	EQUIPAMENTOS	OBSERVAÇÕES
APIC APIC Systemes	Vetorial Matricial	Orientado a objetos	UNIX, Windows	Produzido na França, tem muitas instalações na Europa
ARC/INFO ESRI	Vetorial – topológico Matricial	Relacional	UNIX, Windows	Produtos complementares incluem o Arc/CAD (apoiado em AutoCAD) e o Arc/View (ferramenta de consulta)
AutoDesk World (AutoDesk)	Vetorial	Relacional	Windows	Capaz de ler diretamente arquivos de diversos GIS
DBMapa MaxiData	Vetorial	XBASE	Windows	Apoiado no MaxiCAD
Genasys Genasys	Matricial Vetorial	Relacional	UNIX, Windows	
GIS Plus Caliper	Vetorial	Relacional	Windows	O TransCAD, especializado em transportes, é baseado no GIS Plus
IDRISI Clark University	Matricial	Proprietário	Windows	Muito voltado para Aplicações Ambientais
MapInfo MapInfo	Vetorial	Proprietário Xbase	Windows	Principalmente utilizado como ferramenta de Desktop Mapping
Mapitude Caliper	Matricial Vetorial	Relacional	Windows	Mais usado como desktop mapping
MGE Intergraph	Vetorial Matricial	Relacional	UNIX, Windows	Baseado no sistema de CAD MicroStation
SPRING INPE	Matricial Vetorial	Relacional	UNIX, Windows	Permite uma integração entre vetores e imagens
Vision*GIS System House	Vetorial Matricial	Relacional	UNIX	Pioneiros no armazenamento de gráficos dentro do BD

* Adaptador de Câmara e Medeiros (1996)

14.1.1 – Características dos SIGs

Qualquer sistema de informação geográfica apresenta duas características principais:

- Permite inserir e integrar, numa única base de dados (banco de dados), informações espaciais provenientes de diversas fontes tais como: cartográficas, imagem de satélites, dados censitários, dados de cadastro rural e urbano, dados de redes e de MNT (Modelo Numérico de Terreno).
- Oferece mecanismo para combinar várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, bem como de consulta, recuperação, visualização e plotagem do conteúdo dessa base de dados georeferenciados.

Segundo INPE (1997), de modo geral, qualquer SIG é capaz de:

- Representar graficamente informações de natureza espacial, associando a estes gráficos informações alfanuméricas tradicionais,
- Representar informações gráficas sob a forma de vetores (pontos, linhas e polígonos) e/ou imagens digitais (matrizes de pixels).
- Recuperar informações com base em critérios alfanuméricos. Semelhante a um sistema de gerenciamento de bancos de dados tradicional, e com base em relações espaciais topológicas, tais como contigüência, adjacência e interceptação.
- Realizar operações de aritmética de polígonos, tais como união, interseção e diferença. Gerar polígonos paralelos (*buffers*) ao redor de elementos ponto, linha e polígono.
- Limitar o acesso e controlar a entrada de dados através de um modelo de dados, previamente construído.
- Oferecer recursos para a visualização dos dados geográficos na tela do computador, utilizando para isto uma variedade de cores,
- Interagir com o usuário através de uma interface amigável, geralmente gráfica.
- Recuperar de forma ágil as informações geográficas, com o uso de algoritmos de indexação espacial.
- Possibilitar a importação e exportação de dados de/para outros sistemas semelhantes, ou para outros softwares gráficos.
- Oferecer recursos para a entrada e manutenção de dados, utilizando equipamentos como mouse, mesa digitalizadora e *scanner*.
- Oferecer recursos para a composição de saídas e geração de resultados sob a forma de mapas, gráficos e tabelas, para uma variedade de dispositivos, como impressoras e *plotters*.
- Oferecer recursos para o desenvolvimento de aplicativos específicos, de acordo com as necessidades do usuário, utilizando para isto alguma linguagem de programação, inclusive possibilitando a customização da interface do SIG com o usuário

Todos estes recursos podem ser agrupados em categorias, para facilitar a comparação entre diferentes sistemas. Estas categorias básicas são: entrada de dados, gerenciamento de informações, recuperação de informações, manipulação e análise, e exibição e produção de saídas. Cada uma destas categorias será apresentada a seguir.

14.1.2 – Configuração de um SIG

Numa visão abrangente, pode-se dizer que um SIG é composto de cinco componentes independentes, porém interligados uns aos outros, através de funções específicas. Os componentes do SIG são: *entrada e integração de dados, funções de consulta e análise espacial, visualização e plotagem e Banco de Dados Geográficos* (Figura 14.1).

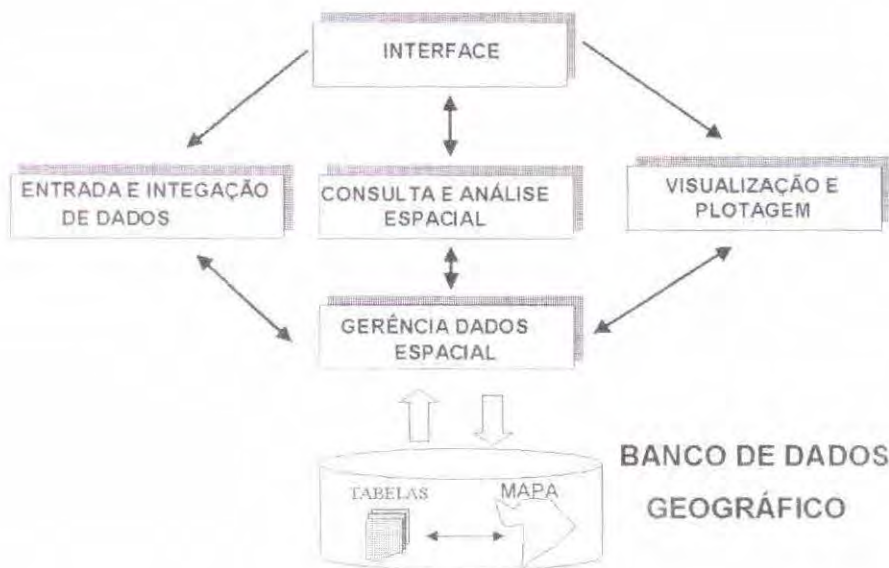


Fig. 14.1: Estrutura Geral de um Sistema de Informações Geográficas
 FONTE: Adaptada de Câmara e Medeiros (1996).

14.1.2.1 - Interface

A interface constitui-se de um conjunto de funções que serve como suporte de entrada e integração dos dados. As funções relacionadas à interface são acionadas através de menus (Câmara et al., 1996).

14.1.2.2 – Entrada e integração de dados

A entrada refere-se a todos os aspectos de aquisição de dados espaciais, contidos em mapas, fotografias aéreas, imagens de satélites, dados de campo, dados digitalizados, etc. Conforme podemos observar, os dados provêm de várias fontes. Quase sempre é necessário converter estes dados num único formato que possa ser interpretado pelo SIG.

Duas das principais tarefas de integração dos dados são: conversão de formato e identificação do local do objeto nos dados originais de maneira sistemática. Para auxiliar nestas tarefas utiliza-se mesa digitalizadora, “Scanner”, etc.

Os dados de satélites, para muitos SIGs, têm que ser transformados para outros tipos de formatos para que sejam introduzidos no SIG. Por exemplo, os dados de satélites que são processados no Laboratório do INPE, em Cachoeira Paulista-SP, são gravados em vários formatos. Um deles é o formato TIFF. Para que estes dados sejam analisados e manipulados no Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING) é necessário convertê-los para o formato GRIB, que é feito no módulo IMPIMA, sobre o qual falaremos mais tarde.

14.1.2.3 – Consulta e análise espacial

Neste componente do SIG, são os operadores analíticos que manipulam o conjunto de dados para gerar novas informações. Aqui estão envolvidos todos os softwares de tratamento dos dados, e consiste de algoritmos que realizam operações de pré-processamento, de classificação e de pós-processamento.

14.1.2.4 – Visualização e plotagem

Este componente, como o próprio nome diz, serve para visualizar e plotar os dados quer sejam espacial ou alfanuméricos. Para auxiliar nesta tarefa empregam-se monitores de vídeo, impressoras e plotters.

14.1.2.5 – Banco de dados geográfico

Um banco de dados, muitas vezes também chamado de base de dados, é um conjunto de arquivos estruturados de forma a facilitar o acesso a determinadas informações que descrevem determinadas entidades do mundo real. Para entender a diferença básica entre banco de dados e banco de dados geográfico, Câmara e Medeiros (1996) citam, como exemplo, um banco de dados de funcionários de uma empresa que contém pelo menos três tipos de arquivos: dados pessoais (nome, endereço, dados de documentos, etc), dados funcionais (cargo, data de admissão, etc) e dados para pagamento (salário base, faixa salarial, etc). Observe que este banco de dados não tem nenhuma referência geográfica, por esta razão, ele é chamado *banco de dados convencional*.

Por outro lado, um banco de dados geográficos (BDG) difere do convencional por armazenar além dos dados alfanuméricos, dados sobre a localização das entidades. No exemplo anterior, o banco de dados convencional pode ser transformado em BDG se for introduzido mais um arquivo que associe cada funcionário a uma localização geográfica do local onde mora ou onde trabalha. Neste caso, foi necessário introduzir uma referência geográfica em termos de pares de coordenadas geográficas.

Além da forma de armazenamento (referenciado) as diferenças entre um banco de dados comum e o BDG abrangem também o tipo de operação que pode ser realizada. No caso do banco de dados convencional é possível fazer consulta para saber o endereço do funcionário X ou Y. Já no BDG é possível saber o endereço do funcionário X e do Y e qual a distância entre suas residências porque este comporta dados de localização.

Para obter a estruturação dos dados dentro do BDG é preciso que se realizem atividades denominadas *MODELAGEM DE DADOS* que especifica o conjunto de aplicações necessárias para estruturar corretamente os dados armazenados.

No caso de sensoriamento remoto o banco de dados geográficos é estruturado na forma de *PROJETOS*, contendo, cada um desses projetos, as informações espaciais e não-espaciais (alfanuméricas) armazenadas, segundo sua categoria, em planos de informações (Pis), conforme é esquematizado na Figura 14.2.

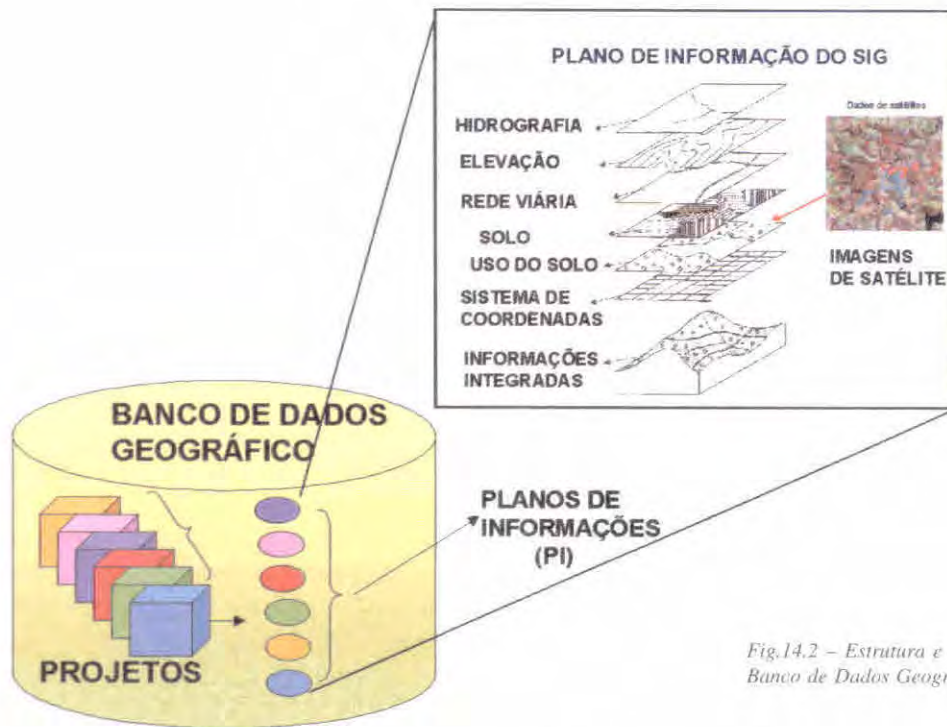
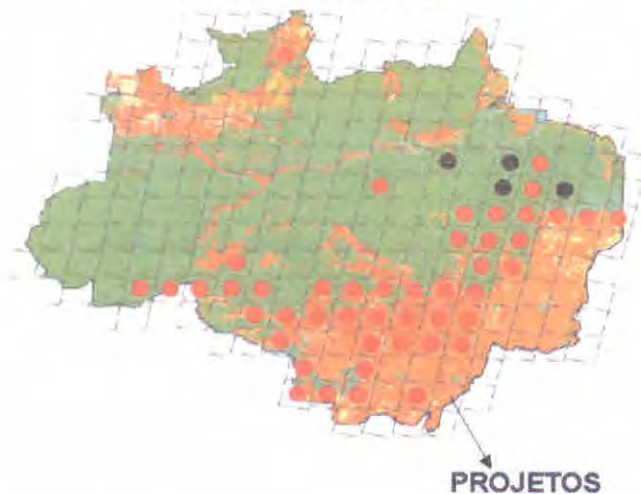


Fig.14.2 – Estrutura e organização de um Banco de Dados Geográficos

Um exemplo de um grande Banco de Dados Geográfico é o projeto de desflorestamento da Amazônia, coordenado pelo INPE, que contém 228 “projetos”, para uma área total de quase 5 milhões de km² (Figura 14.3). Cada projeto possui 5 “planos de informação” (fisionomia florestal, hidrografia, rede viária, base municipal e desflorestamento).

Cada projeto do banco geográfico da Amazônia é constituído por diversos planos de informações referentes às imagens do satélite

CROQUI DE DISTRIBUIÇÃO DE IMAGENS LADSAT NA AMAZÔNIA LEGAL



Landsat, resultados da interpretação visual dos anos anteriores (chamado de agregado), resultados do modelo linear de mistura espectral (componentes sombra, solo e vegetação, resultados de segmentação e de classificação, etc).

Dados cartográficos, fotografias aéreas, imagens de satélites e mapa temáticos são armazenados no banco de dados geográficos em duas grandes classes de representação: **REPRESENTAÇÃO MATRICIAL** e **VETORIAL**, às vezes chamadas de estruturas ou erroneamente de formato.

Fig.14.3 – Estrutura do Banco de Dados da Amazônia Legal com as articulações das imagens do Landsat-TM.
 FONTE: INPE (2001)

14.2 Representação Matricial

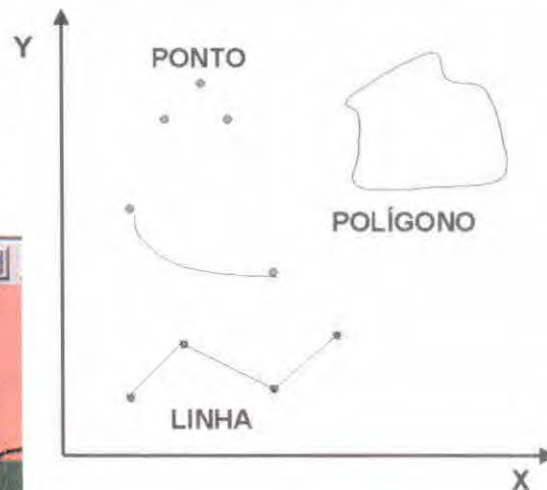
Na estrutura matricial, o espaço é representado como uma matriz $P(m, n)$ composto de m colunas e n linhas, sendo que cada célula possui um número de linha, um número de coluna e um valor (Z) correspondente ao atributo investigado. Nos dados de satélites o valor Z refere-se ao número digital (nível de cinza) médio dos alvos dentro do pixel. Cada célula é individualmente acessada pelas suas coordenadas.

Na representação matricial supõe-se que o espaço possa ser tratado como uma superfície plana, em que cada célula está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou de documento e a área por ela coberta no terreno.

14.3 Representação Vetorial

No modelo vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas. Este tipo de representação não é exclusivo do GIS, sistemas CAD e outros tipos de sistemas gráficos também utilizam representações vetoriais. Isto porque o modelo vetorial é bastante intuitivo para engenheiros e projetistas, embora estes nem sempre utilizem sistemas de coordenadas ajustadas à superfície da Terra para realizar seus projetos, pois para estas aplicações um simples sistema de coordenadas cartesianas é suficiente. Na representação vetorial, um elemento ou objeto é representado por pontos, linhas, áreas ou polígonos, conforme é ilustrado na Figura 14.4.

Fig. 14.4 - Elementos da representação vetorial
 FONTE: Câmara e Medeiros (1996).



Na Figura 14.5 é mostrado um mesmo mapa representado no formato raster e vetorial.

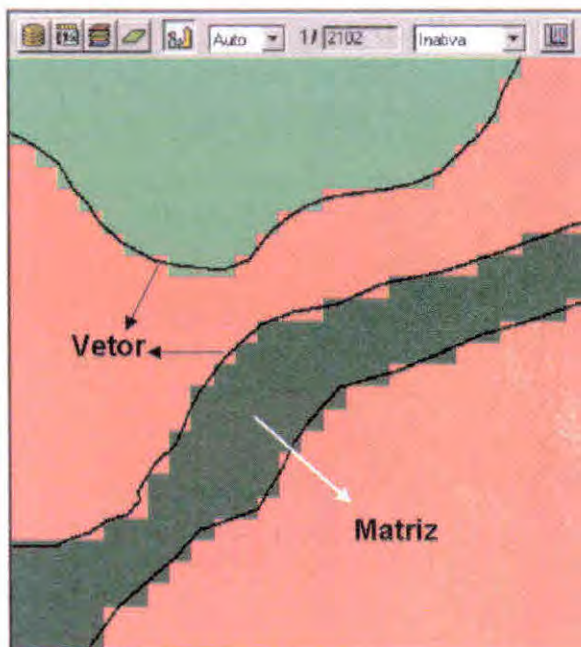


Fig. 14.5 – Imagem temática representada no formato raster e no vetorial
 FONTE: Câmara e Medeiros (1996)

Quando utilizamos a expressão *vetores*, estamos nos referindo a alguma combinação de pontos, linhas poligonais e polígonos, conforme definidos a seguir:

Um **ponto** é um par ordenado (x, y) de coordenadas espaciais. Além das coordenadas, outros dados não-espaciais (atributos) podem ser arquivados para indicar de que tipo de ponto se está tratando, por exemplo, Pico da neblina em que o atributo alfanumérico é associado a um ponto geográfico representado num mapa.

As **linhas poligonais** são um conjunto de pontos conectados. Além das coordenadas dos pontos que compõem a linha, deve-se armazenar

informações que indiquem de que tipo de linha se está tratando, ou seja, a que atributo ela está associada, por exemplo linhas de drenagem, linhas da rede viária, etc.

Um *polígono* é a região do plano limitada por uma ou mais linhas poligonais conectadas de tal forma que o último ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro da próxima.

14.4 Funções de Manipulação e Análise de Dados Geográficos

As funções de manipulação e análise de dados geográficos podem ser agrupadas de acordo com o tipo de dado tratado (correspondente a uma geometria distinta). No caso do sensoriamento remoto as principais funções são: *análise geográfica, tratamento de imagens, modelagem de terreno, redes, geodesia e fotogrametria, produção cartográfica*. (INPE, 1999)

14.4.1 - Análise Geográfica

Esta função permite a combinação de informações temáticas. Pode ser realizada no domínio vetorial ou domínio matricial ("raster"). Um conjunto importante de procedimentos de análise geográfica foi definido por Tomlin (1990). Denominado "Álgebra de Mapas", estas definições são a base de implementações de operadores de análise em diferentes sistemas. Estas funções incluem:

- Reclassificação;
- Intersecção ("overlay");
- Operações, booleanas e matemáticas entre mapas; e
- Consulta ao banco de dados.

14.4.2 - Tratamento de Imagens

Esta função é destinada ao tratamento de dados digitais de satélites ou dados de "Scanners" (Fotografias aéreas escaniadas, etc).

Em sensoriamento remoto, o objetivo maior do processamento digital de imagens, ou melhor do geoprocessamento, é extrair informações de ocupação do solo através da categorização automática de todos os "pixels" contidos numa cena, com base nas diferenças de níveis de cinza ou da reflectância aparente (quando feito a retificação radiométrica). Em outras palavras, dizer que tipo de alvo corresponde à informação espectral coletada pelo sistema sensor de determinado satélite ou equipamento. Por esta razão, esta função de manipulação é tratada com exclusividade e de forma bem detalhada no Capítulo 15.

14.4.3 - Modelagem Numérica do Terreno

A função de modelagem numérica de terreno permite o cálculo de declividade, volume, cortes transversais, linha de visada, etc. O uso desta função é fundamental em aplicações de engenharia na determinação de:

- Mapas de contorno (isolinhas);
- Mapas de declividade e de aspecto;
- Mapas em visualização 3D (com imagens e temas);
- Cálculo de volumes; e
- Análise de perfis.

14.4.4 - Geodesia e Fotogrametria

As funções geodesia e fotogrametria são fundamentais em aplicações de cartografia automatizada e atualização de mapeamento. Esta função permite, por exemplo, realizar procedimentos de restituição e ortoretificação digital, que era executado por equipamentos analógicos.

14.4.5 - Modelagem de Redes

O pacote mínimo (básico) de modelagem de redes, disponível nos sistemas comerciais, consiste tipicamente de cálculo de caminho ótimo e crítico. Este pacote básico é insuficiente para a realização da maioria das aplicações, pois cada usuário tem necessidades completamente distintas. No caso de um sistema telefônico, o questionamento pode ser: “quais são todos os telefones servidos por uma dada caixa terminal?”. Já para uma rede de água, pode-se perguntar: “Se injetarmos uma dada porcentagem de cloro na caixa d’água de um bairro, qual a concentração final nas casas?”. Deste modo, um sistema de modelagem de redes só terá utilidade para o cliente depois de devidamente adaptado as suas necessidades. Esta adaptação pode levar de seis meses a vários anos. Isto impõe uma característica básica para esta aplicação, ou seja, os sistemas devem ser versáteis, maleáveis, e adaptáveis. No caso das aplicações de redes, a ligação com banco de dados é fundamental. Toda a informação descritiva está guardada no banco de dados, pois os dados espaciais têm formatos relativamente simples.

14.5 Objetos Não-Espaciais

Um objeto não-espacial é aquele objeto que não possui localizações espaciais associadas. Assim, a noção de objeto não-espacial engloba qualquer tipo de informação que não seja georeferenciada e que se queira agregar a um SIG.

Um exemplo de objeto não-espacial é o caso de um cadastro rural, mostrado na Figura 6.6. Neste caso, tem-se os geo-objetos da classe “fazendas” (que estão referenciados espacialmente) e deseja-se estabelecer a ligação entre estes geo-objetos e a informação alfanumérica já existente sob a forma de um cadastro de propriedades. Neste caso, as informações de cadastro são consideradas um *objeto não-espacial*.

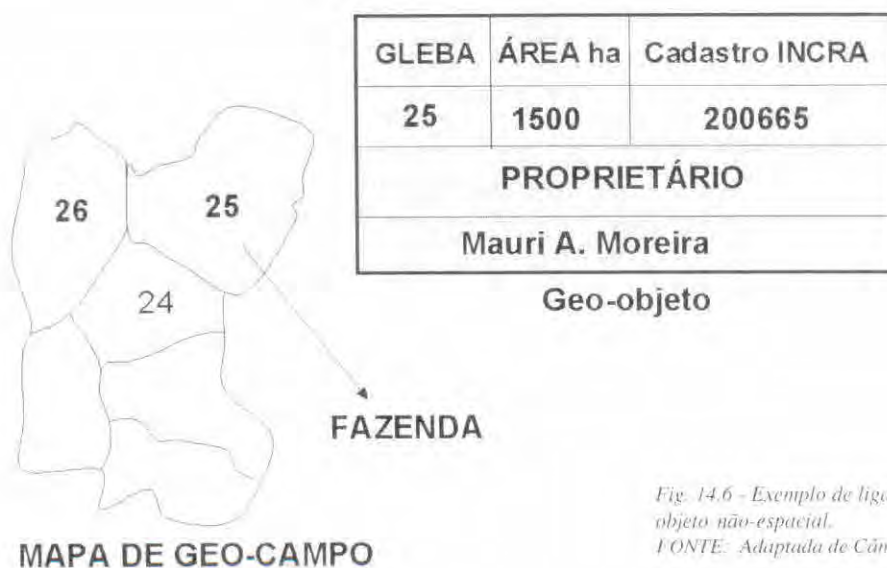


Fig. 14.6 - Exemplo de ligação entre geo-objeto e objeto não-espacial.

FONTE: Adaptada de Câmara e Medeiros (1996)

14.6 Exibição e Produção Cartográfica

Os enfoques adotados pelos GIS com relação à saída de dados tendem a se concentrar em duas categorias: a que prioriza a produção e a que prioriza os recursos de consulta. Na primeira, a ênfase é na produção automatizada de mapas em papel, tabelas e relatórios, enquanto na segunda o interesse gira em torno da resposta interativa do sistema às demandas do usuário.

No caso de plotagem, alguns SIGs dispõem de ferramentas para produção de cartas, com recursos muitas vezes altamente sofisticados de apresentação gráfica. Estas ferramentas permitem a definição interativa de uma área de plotagem, colocação de legendas, textos explicativos e notas de crédito. Uma biblioteca de símbolos é também atributo fundamental de um sistema de produção. Os pacotes mais sofisticados dispõem de controladores para dispositivos de gravação eletrônica a laser, o que assegura a produção de mapas de alta qualidade.

Com base na discussão apresentada nesta seção, a Tabela 14.2 apresenta os requisitos típicos de cada grupo de usuário, considerando grandes áreas de aplicação. Não é supérfluo advertir de que se trata de uma indicação de caráter geral e que cada usuário deverá examinar em detalhe suas necessidades e compará-las com as características dos sistemas disponíveis no mercado (Câmara e Medeiros, 1996).

Tabela 14.2 - Necessidades típicas de aplicações de geoprocessamento

APLICAÇÃO	ANG	PDI	MNT	RED	BDG	MAP	GEO
Cadastral	v	v	v	v	v	v	v
Cartografia	-	v	v	-	(v)	v	v
Ambiental	v	v	v	(v)	(v)	v	(v)
Concessionárias	-	-	-	v	v	-	(v)
Rural	-	v	v	(v)	v	v	-
Business	-	-	-	v	v	v	-

Códigos:

ANG = análise geográfica **BDG** = consulta a BD: georreferenciados

PDI = processamento digital de imagens **MAP** = produção cartográfica

MNT = modelos numéricos de terreno **GEO** = geodésia e fotogrametria

RED = modelagem de redes

Legenda: v = normalmente necessário (v) = usualmente não necessário.

Capítulo 15

Tratamento de dados digitais

No sensoriamento remoto orbital, os usuários de dados de satélites têm à disposição dois tipos de produtos, para extrair informações sobre os alvos da superfície terrestre, ou seja, os produtos analógicos e os digitais.

No tratamento dos dados no formato analógico (fotográficos) empregam-se técnicas de interpretação visual, de maneira muito semelhante às utilizadas na fotointerpretação de fotografias aéreas.

O tratamento de dados digitais tem os mesmos objetivos da interpretação visual, ou seja, extrair informações sobre alvos da superfície terrestre, através de automatização da análise de dados coletados por sensores remotos, visando substituir os procedimentos de interpretação visual. Para este fim foram criados aplicativos “softwares” e implementados em computadores e estações de trabalho “workstations”.

Embora o tratamento (classificação) de imagens digitais seja parte componente da maioria dos SIGs, optou-se em discutir, em separado, as abordagens metodológicas empregadas na obtenção de informações a respeito da ocupação do solo, dentro de uma área imageada por um sistema sensor qualquer. O motivo desta opção reside no fato de ser a classificação o objetivo final de qualquer usuário porque é através dela que se obtém as informações desejadas, quando se usa o computador para esta finalidade.

Quanto aos outros tipos de informações que são inseridas no sistema, tais como rede de drenagem, rede viária, dados cadastrais, etc, são tarefas que requerem aplicativos específicos para este fim e, do ponto de vista de classificação, essas informações são complementares, contribuindo apenas para melhorar os resultados obtidos nas imagens de satélites. Em geral essas informações são extraídas de cartas topográficas, cadástrais e mapas temáticos pré-existentes.

Antes de discutir o procedimento de análise das imagens digitais, para identificar a ocupação do solo em cada “pixel” da imagem, é necessário introduzir uma noção básica sobre cores, uma vez que nos sistemas de classificação empregam-se, com muita frequência, imagens coloridas, para auxiliar o fotointérprete na identificação dos diferentes alvos que compõem a cena.

15.1 A Cor no Processamento de Imagens Digitais

A cor é uma das propriedades da luz mais difícil de conceituar, pois depende não apenas de fatores físicos, mas também de fatores fisiológicos e psicológicos. Por exemplo, é fácil perceber a

mudança das cores quando vista à luz do sol e/ou de uma lâmpada fluorescente.

Newton foi o primeiro a verificar a verdadeira natureza da luz, ao decompor a luz branca, através de um prisma e depois recompô-la por meio de lentes. Ele foi também o primeiro a explicar porque certos objetos possuem diferentes cores. Segundo Newton, os objetos aparecem coloridos quando expostos à luz branca porque eles refletem alguns de seus componentes espectrais com maior intensidade do que outros.

Do ponto de vista psicológico, a cor expressa a sensação de visão no cérebro, provocada pela incidência de um fluxo de radiação eletromagnética, em determinados comprimentos de onda. Por exemplo, a cor vermelha, nada mais é do que a sensação de visão no cérebro, provocada pela incidência da radiação de comprimento de onda situada entre 600 e 700 nm.

Quando um objeto é iluminado por uma luz branca, a radiação eletromagnética dentro da faixa espectral de 400 a 700 nm, que é refletida, é espalhada igualmente. Assim, a sensação de cor do objeto radiador é branca.

Essa mistura de radiações, com diferentes comprimentos de onda que foram espalhadas, dá a sensação de cor e que é chamada de matiz. Por exemplo, um objeto que apresenta um matiz verde é aquele que absorve todas as radiações na região do visível, exceto aquelas radiações situadas entre 500 e 600 nm, que é a região denominada de verde do espectro eletromagnético.

O branco e o negro são cores acromáticas (literalmente cores não coloridas) pois não estão presentes no espectro da luz visível. A mistura das duas pode gerar uma infinidade de tons de cinza, sendo que o olho humano é capaz de discriminar até 300 gradações entre ambos os extremos. Qualquer superfície que reflita igualmente a luz solar, em todos os comprimentos de ondas da região do visível apresentará uma cor acromática.

Todas as outras cores constituem o grupo das cores cromáticas (coloridas), que podem ser subdivididas em dois subgrupos: a) as monocromáticas ou espectralmente puras – formadas por um único comprimento de onda b) as complexas ou espectralmente impuras – formadas por uma mistura de cores cromáticas, em mais de um comprimento de onda. Desta forma, todas as cores cromáticas poderão ser obtidas por misturas, em diferentes proporções, de cores puras. Entretanto, as cores reais são misturas de cores cromáticas e acromáticas, sendo esta última responsável pelo brilho de uma cor. Por exemplo, uma cor brilhante é obtida pela combinação de uma cor cromática qualquer com uma cor acromática clara.

Há mais de 200 anos que as experiências vêm demonstrando que todas as cores podem ser obtidas pela combinação de apenas três cores monocromáticas, denominadas cores “primárias”. As três cores primárias são: azul ($\lambda = 440$ nm), verde ($\lambda = 550$ nm) e vermelho ($\lambda = 700$ nm). É oportuno deixar claro que, estes comprimentos de ondas representam a máxima pureza da cor monocromática, porém outras radiações eletromagnéticas situadas fora desses comprimentos de onda podem provocar uma sensação de uma destas três cores em nosso cérebro. Em outras palavras, todas as radiações eletromagnéticas situadas entre 400 e 500 nm, provocam sensação de cor azul no cérebro humano, embora a cor azul pura (monocromática) seja aquela de comprimento de onda de 440 nm.

Existem dois processos de formação de cores: o processo aditivo e o subtrativo. No processo aditivo, utiliza-se a mistura de duas ou três cores primárias, para obter uma cor secundária. As cores secundárias resultantes dessa mistura são: magenta, amarelo e o cian, conforme é mostrado na Figura 15.1A. Pelo processo subtrativo, é possível obter as cores primárias através da mistura das cores secundárias (Figura 15.1B).

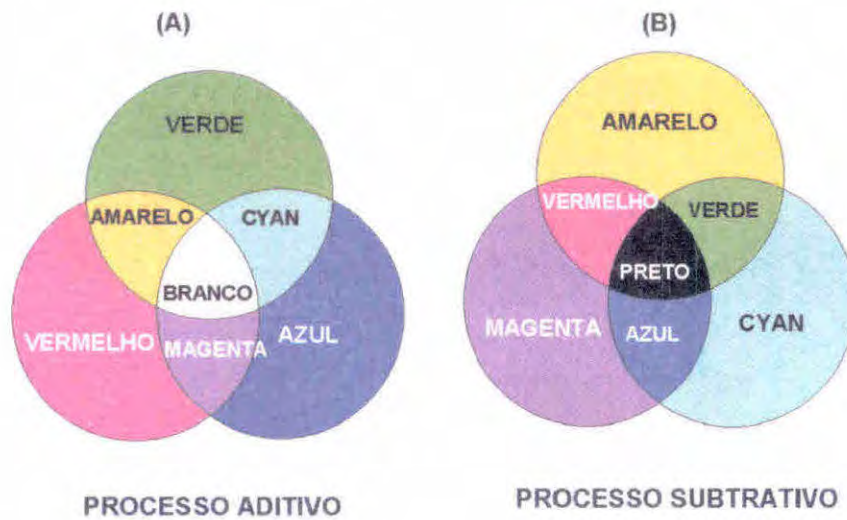


Fig. 15.1 – Processos aditivo (A) e subtrativo (B) de formação de cores.

Associando cores primárias às informações espectrais, contidas em três bandas quaisquer dos sistemas sensores, obtém-se uma composição colorida. Este procedimento é bastante utilizado durante a fase de pré-processamento, cuja finalidade é aumentar a acuidade do sistema visual humano em discernir diferentes feições na imagem, durante a fase de classificação.

Dependendo da associação das cores às bandas, os alvos serão representados por uma ou outra cor secundária. As variações na intensidade da cor resultante são consequência das variações dos alvos, por exemplo, a vegetação pode assumir diferentes tamanhos, espaçamento, tipos, tamanho da folha, etc. Isto, fará com que uma cor secundária tenha variações no matiz da cor. Nas Figuras 15.2 e 15.3 são mostradas duas imagens coloridas, resultantes de diferentes associações de cores primárias às bandas TM3, TM4 e TM5.

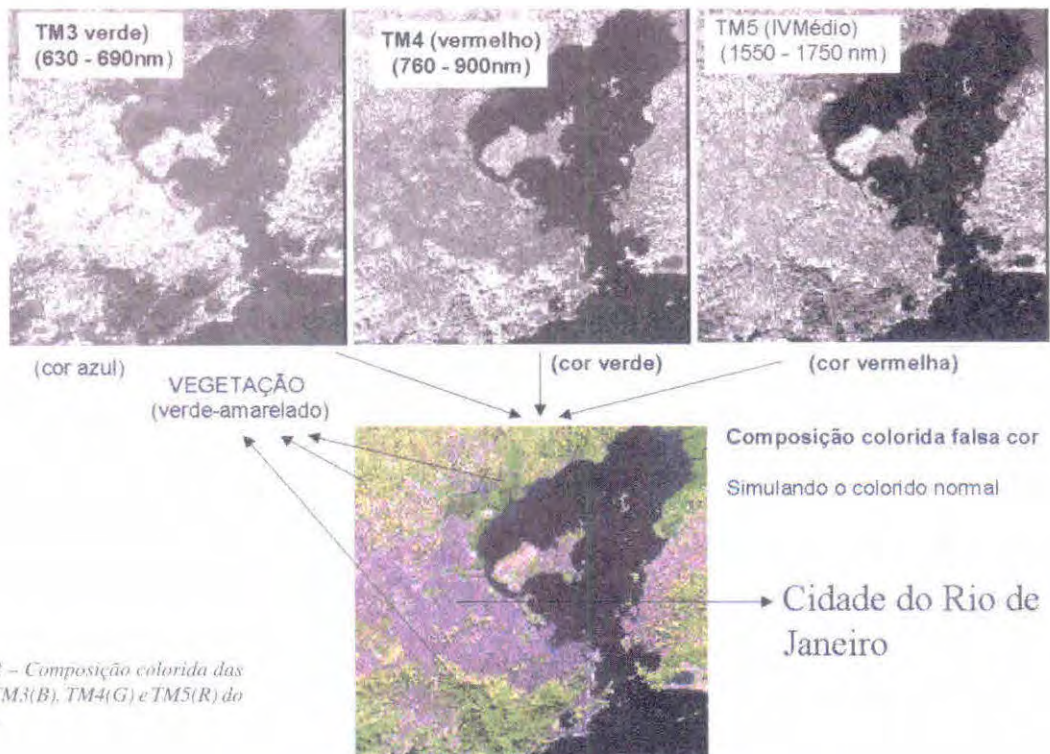


Fig. 15.2 – Composição colorida das bandas TM3(B), TM4(G) e TM5(R) do Landsat.

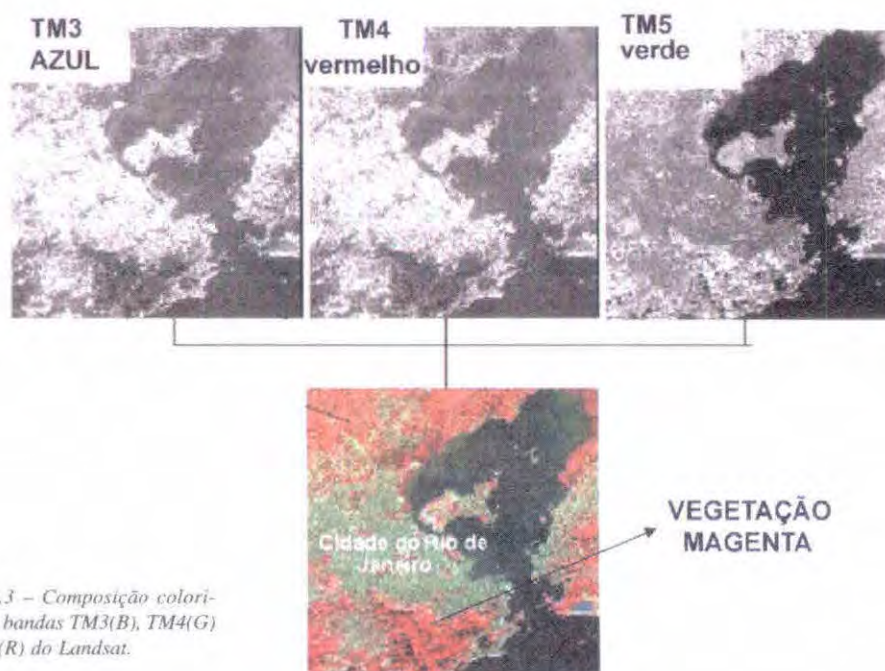


Fig.15.3 – Composição colorida das bandas TM3(B), TM4(G) e TM5(R) do Landsat.

Observa-se, na Figura 15.2, que a vegetação é representada pela cor amarelo-esverdeada, pois a cor verde foi associada aos dados de reflectância da banda TM4 (infravermelho próximo), região de maior resposta espectral da vegetação. O segundo pico de maior resposta espectral da vegetação ocorre na região do infravermelho médio (banda TM5), a qual foi associada à cor vermelha. A mistura dessas duas cores resulta na cor amarela. Entretanto, devido à contribuição da superfície de fundo (no caso o solo que apresenta uma cor vermelha, a qual foi substituída pelo verde) a cor resultante foi o amarelo-esverdeado.

Por outro lado, nota-se, na Figura 15.3, que a combinação de bandas difere daquelas utilizadas na combinação contida na Figura 15.2. Neste caso a banda TM5 foi substituída pela banda TM2 e as cores foram associadas de maneira diferente. Para esta combinação, a cor verde foi associada à banda TM3 e a cor vermelha à banda TM4. Nesta situação a cor predominante será o magenta, resultante da mistura das cores verde e vermelha.

15.2 Tratamento de Dados Digitais

O tratamento de imagens digitais pode ser entendido como a rotulação (identificação) automática de todos os “pixels”, contidos numa determinada cena, em classes temáticas, segundo a ocupação do solo. Em outras palavras, definir que tipo de alvo corresponde à informação espectral contida em cada um dos “pixels” da cena. Para Mascarenhas e Velasco (1984), o tratamento de imagens digitais nada mais é do que a análise e a manipulação de imagens através de técnicas computacionais, com a finalidade de:

- Identificar e extrair informações da imagem sobre fenômenos ou objetos do mundo real.
- Transformar a imagem de tal modo que as informações radiométricas contidas nelas sejam mais facilmente discrimináveis pelo analista.

As técnicas computacionais tentam simular a capacidade do sistema visual humano em reconhecer padrões espectrais nos dados remotamente sensoriados. A grande vantagem do uso do computador no reconhecimento de padrões, em relação à interpretação visual, reside no fato de que eles são capazes de processarem um grande volume de informações presentes na imagem, tarefa, esta, limitada ao ser humano.

Em relação ao tratamento de imagens digitais, isto é, classificação, é interessante esclarecer que, por falta de uma terminologia apropriada na literatura são encontradas várias expressões sobre esse procedimento de análise, tais como: *classificação automática, classificação digital, análise digital, interpretação digital, tratamento digital*, etc.

Na Figura 15.4 é mostrada a configuração básica de um sistema de tratamento de dados digitais.



Fig. 15.4 – Configuração básica para análise de dados de satélite no formato digital.

O procedimento de análise de dados digitais é dividido em quatro fases distintas: *pré-processamento, transformação de dados digitais, classificação propriamente dita e pós-processamento*.

15.2.1 - Pré-processamento

A fase de pré-processamento consiste na preparação dos dados de satélites, para realizar a classificação. Nesta fase, empregam-se técnicas visando melhorar a qualidade dos dados, e as mais utilizadas são: remoção de ruídos, realce de imagem, correção e retificação geométrica e registro, redução da dimensionalidade. Complementando este procedimento, muitas vezes, emprega-se a técnica de correção radiométrica e restauração do "pixel", por exemplo, no estudo de comportamento espectral de alvos agrícolas ao longo do ciclo de crescimento e de desenvolvimento das culturas.

15.2.1.1 – Eliminação de ruído

Ruído corresponde à falta de informações da energia refletida de uma área no terreno, na imagem digital, conforme é mostrado na Figura 15.5. Geralmente o ruído é provocado por uma falha, momentânea, no sistema de registro da energia, no instante do imageamento da área pelo sensor orbital. Uma das técnicas de remoção de ruído que é comumente empregada, consiste em substituir o valor zero da radiância do "pixel" no local do ruído, pela média da radiância dos "pixels" da linha superior e inferior.

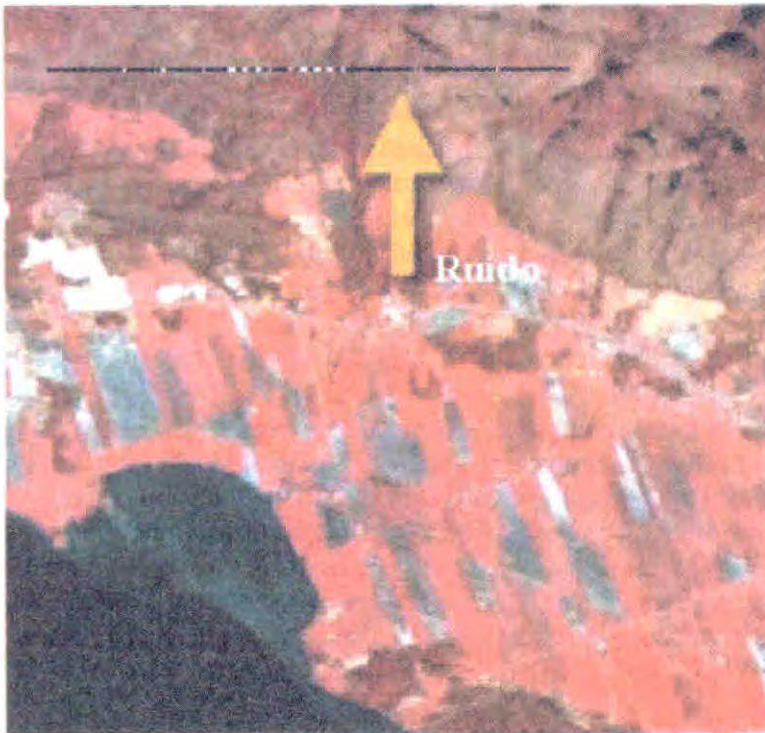


Figura 15.5 – Imagem colorida infravermelho falsa cor, para mostrar a presença de um ruído na parte superior

15.2.1.2 – Realce de imagem

Os dados de satélites, uma vez processados, podem conter um contraste espectral de baixa qualidade visual. O realce de imagens digitais consiste num conjunto de procedimentos aplicados para melhorar a qualidade visual da mesma. Neste caso, o tipo de realce mais empregado é ampliar o contraste de feições existentes na cena, ou seja, os níveis de cinza mais baixos são arrastados para próximos de zero (tonalidade mais escura) e os mais altos para próximos de 255 (cinza claro), conforme é ilustrado nas Figuras 15.6, 15.7 e 15.8.

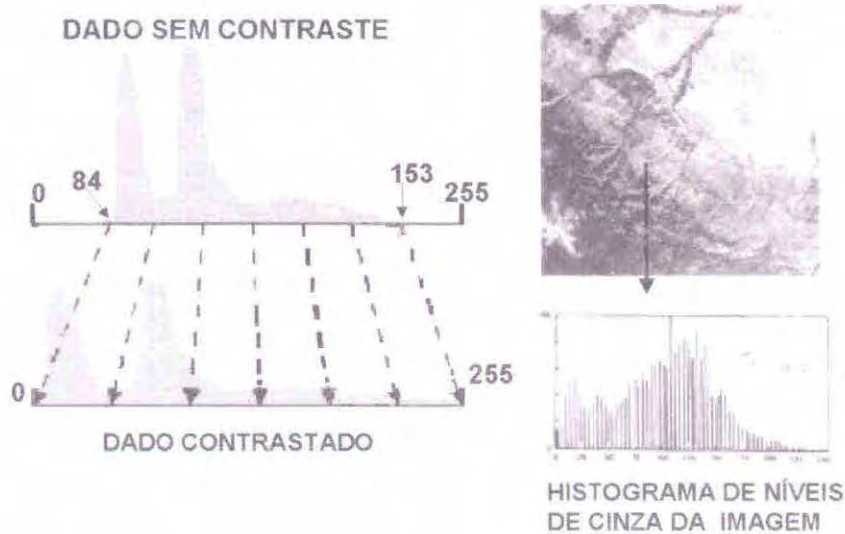


Fig.15.6—Esquema para mostrar uma ampliação de contraste nos valores dos níveis de cinza de uma imagem de satélite.

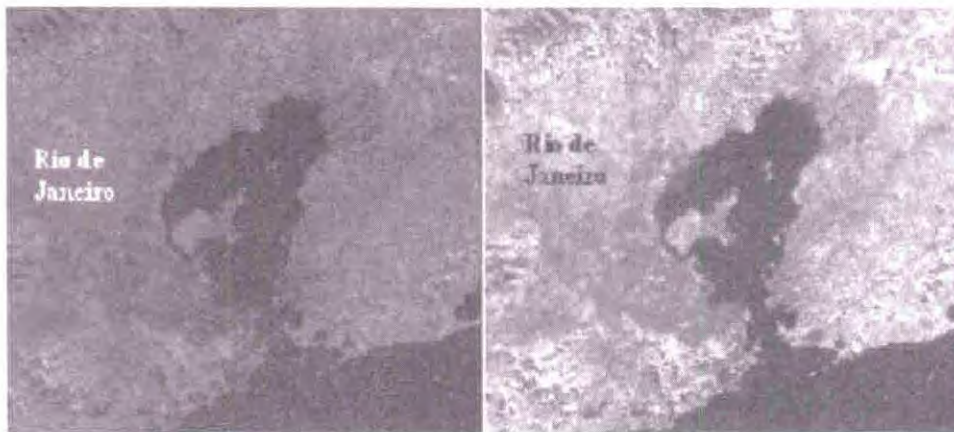


Fig. 15.7 – Imagem do sensor TM4 do Landsat, para mostrar o efeito de contraste.

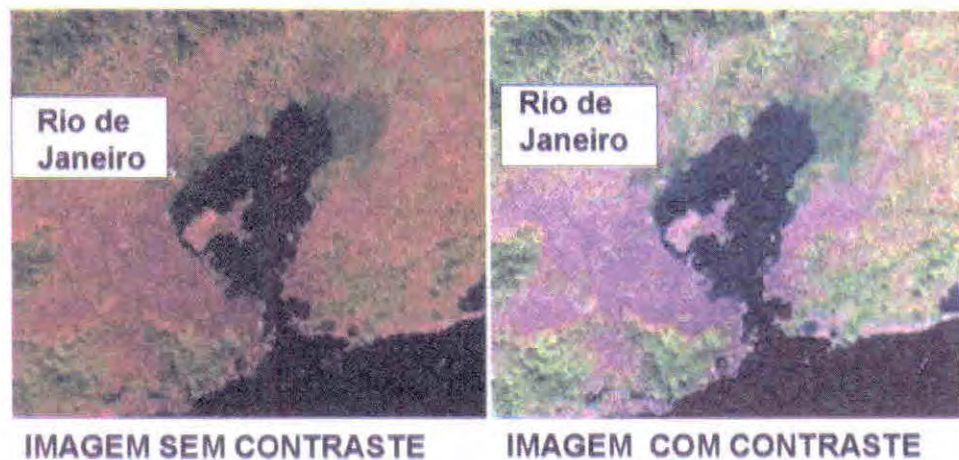


Fig. 15.8 – Composição colorida nas bandas TM3 (B); TM4(G) e TM5(R), para mostrar o efeito de contraste.

15.2.1.3 – Correção, retificação geométrica e registro

A correção geométrica visa eliminar dois tipos de erros que, freqüentemente, ocorrem nos dados de satélites, ou seja, erros devido ao movimento do satélite e erros devido à curvatura da Terra. Além disso, há erros denominados panorâmicos que são causados pelo tamanho dos “pixels” fora do nadir (nadir = visada na perpendicular). Em outras palavras, a correção geométrica pode ser entendida como a transformação dos dados de sensoriamento remoto, de tal modo que eles adquiram as características de escala e projeção próprias de mapas (Mather, 1987).

A correção geométrica pode ser feita de forma específica, isto é, aplicando modelos matemáticos para corrigir os erros (através do relacionamento matemático entre a localização do “pixel”) ou através de coordenadas geográficas da área de interesse. Na prática, esta última abordagem é a mais utilizada, pois independe do conhecimento específico da fonte de distorção.

Para fazer uma correção geométrica, através de coordenadas geográficas, o analista toma quatro pontos da área de estudo (normalmente os cantos da área) e associa, a cada ponto, um par de coordenadas geográficas. Feito isto, o sistema ajusta todos os “pixels” dentro dos quatro pontos de controle, em função das coordenadas de canto.

Obtida a imagem corrigida, o passo seguinte é fazer o registro da imagem com um sistema de referência, geralmente cartas topográficas. Entretanto, pode-se fazer o registro utilizando coordenadas obtidas pelo GPS. Quando se usam cartas topográficas, o procedimento consiste em tomar coordenadas de pontos devidamente identificáveis, tanto na imagem quanto na carta topográfica, para que o sistema possa rotular geograficamente o restante dos pontos da área, ou seja, os pixels da área de interesse nas

imagens de satélite. O número de pontos que se deve tomar para fazer o registro depende do nível de correção da imagem. No Laboratório de Cachoeira Paulista-SP, os dados digitais são processados no nível de correção 4. Para imagens com nível 4 de correção, são necessários seis pontos de controle no mínimo. Para as imagens com nível de correção 5 e 6 basta um ou dois pontos de controle. O registro de imagem é feito utilizando sistemas de equações polinomiais de primeiro, segundo e terceiro grau.

O registro, quando feito imagem-imagem, utiliza a denominação retificação geométrica, cujo procedimento é semelhante ao que se faz para imagem-carta.

15.2.1.4 – Redução da dimensionalidade

Muitas vezes as pesquisas realizadas, através de dados de satélites, são em áreas pequenas, bem menores do que a área de abrangência de uma cena imageada por um determinado satélite. Imagine o caso do sensor TM do Landsat, cuja área imageada é de aproximadamente 35.000 km² (185 km x 185 km). Às vezes, a área de estudo restringe-se a um município com dimensões pouco mais de 200 km². Neste caso, aplica-se o procedimento de redução de dimensionalidade para reduzir o tamanho do arquivo e, conseqüentemente, o tempo de processamento computacional. Na Figura 15.9 é mostrado um exemplo de redução da dimensionalidade no estudo de uso do solo do município de Três Pontas, MG.

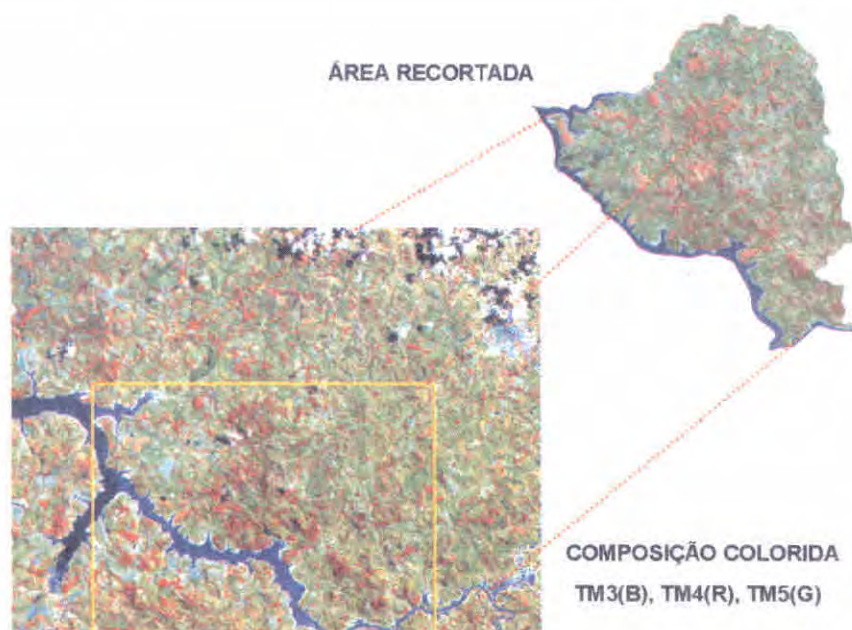


Fig. 15.9 – Composição colorida das bandas TM3(B), TM4(R) e TM5(G) para exemplificar uma redução do dimensionamento da área do município de Três Pontas – MG.

15.2.1.5 – Correção Radiométrica

Os procedimentos de correção radiométrica de imagens incluem tanto as operações puramente cosméticas dos dados, que visam apenas melhorar sua visualização, como aquelas que visam normalizar os dados radiometricamente, seja de modo absoluto ou relativo.

As operações cosméticas visam, por exemplo, eliminar ruído, conforme mostrado na Figura 15.5, ou correções de defeitos nas imagens, conhecido por “*striping*”, cuja origem está associada a um lapso de reação de resposta dos detetores quando recobrem áreas de baixa radiância, após terem passado por áreas de alta radiância. O “*striping*” se caracteriza pela presença de “pixels” com tonalidades claras atravessando regiões sabidamente escuras da cena. Em outras palavras, é o aparecimento de pixels claros no meio de pixels com tons de cinza escuros.

A correção radiométrica para normalização dos dados inclui métodos de calibração absoluta dos dados, de modo que se possa obter medidas quantitativas sobre as propriedades dos alvos que compõem a cena. Segundo Slater (1980), esta abordagem nunca foi adequadamente equacionada. A alternativa à calibração absoluta é o emprego da calibração relativa, também denominada retificação radiométrica.

A retificação radiométrica nada mais é do que o ajuste das radiâncias contidas nas imagens, obtidas em diferentes datas de passagem do satélite, para similares condições atmosféricas, tendo como referência uma dessas passagens. Esse procedimento assegura que as mudanças observadas no comportamento espectral, no tempo e no espaço, estão estritamente ligadas à interação da radiação eletromagnética com o alvo, eliminando assim, quaisquer contribuições do ambiente na reflectância do alvo que foi registrada pelo sensor. Entretanto, a retificação radiométrica não é um procedimento rotineiro nos trabalhos envolvendo análise de dados orbitais. Aplica-se a retificação radiométrica nos casos em que se pretende fazer estudos da trajetória espectral de alvos terrestres, em diferentes datas de passagem do satélite. Por exemplo, quando se pretende estudar a evolução do comportamento espectral de uma cultura agrícola, ao longo do seu ciclo de crescimento e desenvolvimento, ou quando se pretende comparar as informações espectrais de alvos imageados por diferentes sensores e em momentos diferentes.

Para normalizar os dados através da retificação radiométrica, o procedimento é feito em duas etapas. A primeira etapa consiste na conversão dos números digitais (ND) para valores de reflectância aparente. Para tal, pode-se utilizar as relações propostas por Markham e Barker (1986), ou seja, inicialmente convertem-se os números digitais (ND) em valores de radiância, através da Equação 15.1. Nas imagens coletadas pelo Landsat-5, as variáveis da Equação 15.1 são substituídas pelos valores de calibração do TM, contidos na Tabela 15.1.

$$\text{RAD}(\lambda) = L_{\min\lambda} + \frac{(L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda})}{255} \text{ND} \quad (15.1)$$

onde:

$\text{RAD}(\lambda)$ = radiância espectral, em $\text{mWcm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$

$L_{\min\lambda}$ = radiância espectral correspondente ao ND mínimo

$L_{\max\lambda}$ = radiância espectral

ND = número digital do "pixel" considerado

Tabela 15.1 – Valores de reescalonamento dos ND para as bandas do sensor TM/LANDSAT-5 ($\text{mWcm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$).

Banda TM	L_{\max}	L_{\min}
1	15,21	- 0,15
2	29,68	- 0,28
3	20,43	- 0,12
4	20,62	- 0,15
5	2,72	- 0,04
7	1,35	- 0,01

FONTE: Markham e Barker (1986)

Hoje em dia, com o lançamento do Landsat-7, esses valores de reescalonamento dos ND, contidos na Tabela 15.1, podem ser obtidos em tempo real, para cada data de passagem e para cada órbita/ponto. Isto é, já vêm gravados junto com os dados digitais em formato texto, no "head" da imagem.

Os valores de radiância obtidos nesta transformação são convertidos em reflectância aparente pela Equação 15.2.

$$\rho = \frac{\pi L \lambda d^2}{ESol \lambda \cos\theta_s} \quad (15.2)$$

Onde:

ρ = reflectância exo-atmosférica

$L\lambda$ = radiância espectral no detector, $mWcm^{-2} sr^{-1}mm^{-1}$

D = distância Terra-Sol, em unidades astronômicas (aproximadamente =1)

$ESol\lambda$ = irradiância solar exo-atmosférica média, $W cm^{-2}mm^{-1}$

θ_s = ângulo zenital solar, em graus.

Os ângulos zenitais solar são obtidos a partir dos dados dos arquivos em formato texto que acompanham as imagens.

As novas imagens de reflectância aparente, geradas a partir do procedimento acima, não constituem os dados de reflectância real dos alvos, pois no cálculo das novas imagens foram utilizados valores da irradiância no topo da atmosfera (ESol). Entretanto, Godoy Jr. e Novo (1989) observaram que, numa determinada cena, os valores de reflectância aparente variam linearmente com os de reflectância real dos alvos.

A segunda etapa do processo é a retificação radiométrica propriamente dita. Este procedimento consiste numa normalização dos valores radiométricos das imagens de reflectância em relação a uma imagem escolhida como referência. Dentre os métodos utilizados para se fazer a retificação radiométrica destaca-se o método de Hall et al. (1991). Através deste método é feita a transformação linear dos níveis digitais, de uma dada imagem, a partir dos níveis digitais de um conjunto de alvos de comportamento radiométrico constante.

No método de Hall et al. (1991), o critério de seleção dos "pixels" de controle, a ser utilizado na retificação, consiste em submeter os dados originais a uma transformação linear conhecida pelo nome de *Tasselled Cap*. Através desta transformação é definido um novo sistema de coordenadas, de tal modo que os dados das diferentes bandas espectrais passem a ocupar novos eixos, associados às propriedades biofísicas dos alvos.

Os eixos relevantes para a seleção dos "pixels" de controle para realizar a retificação são o Brightness (Brilho) e o Greenness (Verdor). O eixo Brightness é associado às variações de reflectância do solo, enquanto que o eixo de Greenness é associado às variações de reflectância em função do vigor da vegetação verde.

Segundo Hall et al. (1991), a partir da análise do diagrama de dispersão dos níveis de Greenness (Gr) e Brightness (Br) é possível identificar um conjunto de "pixels", claros e escuros. Esses pixels claros e escuros, em geral, estão associados a alvos estáveis em relação a reflectância de uma cena para outra. Para obter os valores radiométricos médios, utilizados na retificação, emprega-se esse conjunto de "pixels" como dado de entrada no sistema. As médias dos valores radiométricos devem ser extraídas tanto das imagens que se deseja fazer a retificação quanto da imagem de referência.

Em geral, o conjunto de pontos está relacionado à áreas não vegetadas com insignificante ou nenhuma mudança ao longo do tempo e, portanto, com pouca ou nenhuma diferença nos seus valores de reflectância. Esta afirmação é verdadeira se as diferenças na calibração dos sensores e as condições atmosféricas entre imagens introduzem apenas diferenças lineares nas radiâncias dos pontos selecionados para controle.

Para obter a reflectância média dos pontos de controle utiliza-se o fatiamento das imagens Br e Gr de cada data, escolhendo para os pontos claros os intervalos de valores mais altos e para os escuros os mais baixos. O fatiamento nada mais é do que operações feitas para realçar os “pixels” cujas intensidades se situam dentro de um intervalo específico (a fatia), isto é, entre um máximo e um mínimo. O fatiamento pode ser realizado de três maneiras distintas: normal, equidistante e arco-íris. Nas Figuras 15.10 e 15.11 são mostradas duas imagens Greenness e as máscaras com os pontos (áreas) claros e escuros.

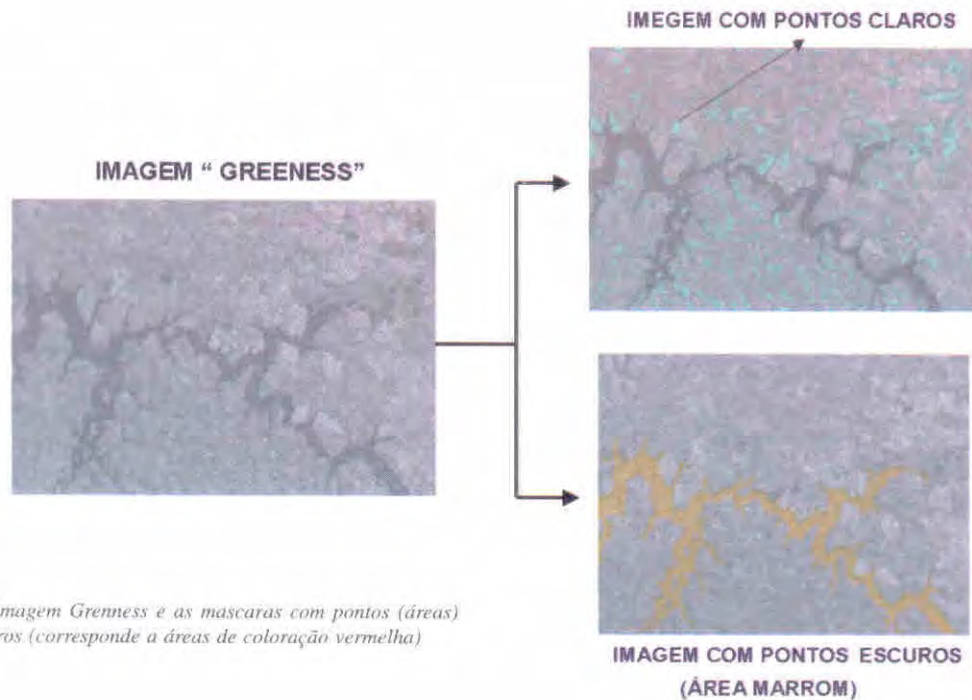


Fig.15.10 – Imagem Greenness e as máscaras com pontos (áreas) claros e escuros (corresponde a áreas de coloração vermelha)

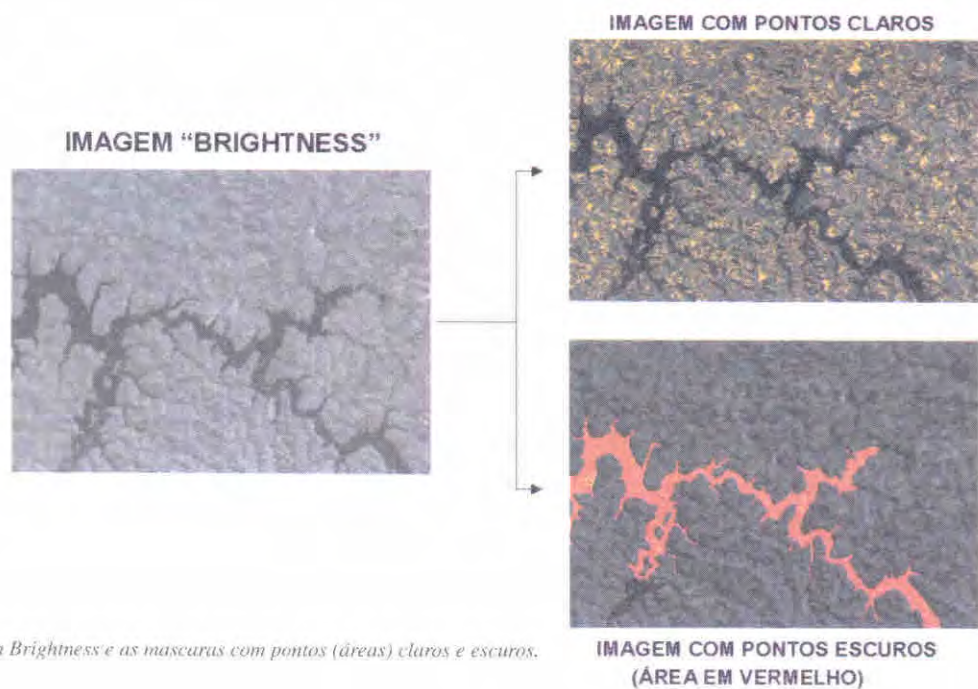


Fig. 15.11- Imagem Brightness e as máscaras com pontos (áreas) claros e escuros.

É importante ressaltar aqui que o fatiamento é muito usado para outras finalidades além do objetivo de retificação radiométrica. Por exemplo, ele pode ser usado para determinar diferentes temperaturas das águas oceânicas, através de classificação de dados do NOAA.

Tendo feito o fatiamento é, então, gerado uma máscara para o conjunto de pontos claros na imagem Gr de uma determinada data que é cruzada com a máscara de pontos claros na imagem Br dessa mesma data. Esse cruzamento dá origem a uma nova máscara, referente aos pontos claros da imagem. O mesmo procedimento deve ser realizado para os pontos escuros. Posteriormente, essas máscaras são superpostas às imagens de reflectância e extraem-se delas as médias dos valores de reflectância dos alvos claros e escuros para todas as bandas de interesse. Esse procedimento é ilustrado no fluxograma da Figura 15.12.

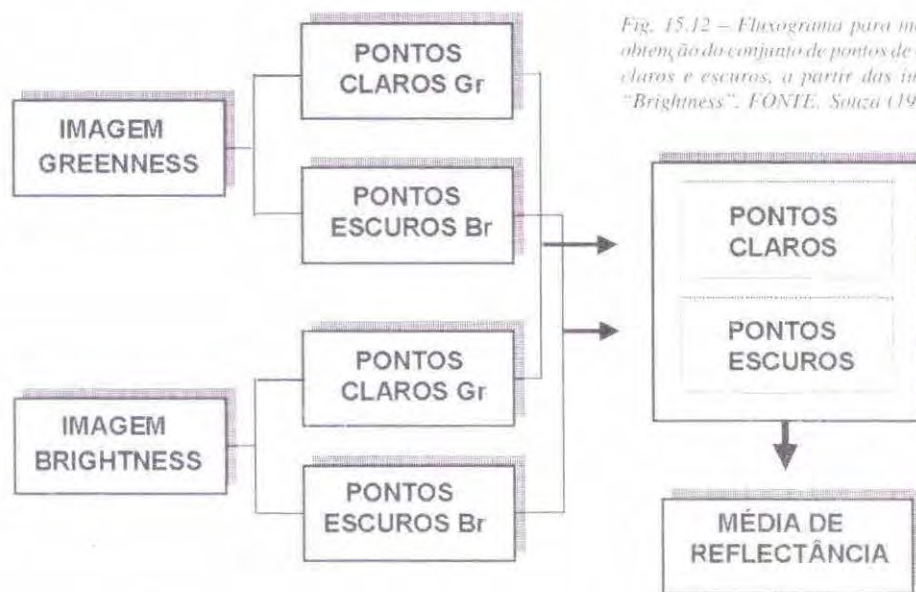


Fig. 15.12 – Fluxograma para mostrar a sequência de obtenção do conjunto de pontos de controle radiométrico, claros e escuros, a partir das imagens "Greenness" e "Brightness". FONTE: Souza (1997, p.63).

Os valores médios da reflectância, obtidos para todas as bandas de interesse e para todas as datas de passagem do satélite, são utilizados na Equação 15.3, proposta por Hall et al. (1991) para retificar as imagens:

$$T_i = m_i x_i + b_i \quad (15.3)$$

onde:

T_i = reflectância da imagem retificada

$m_i = (Br_i - Dr_i) / (Bs_i - Ds_i)$

Br_i = média do conjunto de referência claro

Dr_i = média do conjunto de referência escuro

Bs_i = média do conjunto claro a ser retificado

Ds_i = média do conjunto escuro a ser retificado

i = banda do sensor em questão.

15.3 Transformações de Imagens Digitais

Para muito dos objetivos da classificação de imagens de satélites no formato digital, o uso de dados espectrais transformados é, às vezes, mais conveniente do que trabalhar com os originais.

Dentre os métodos existentes para fazer a transformação de dados de satélites, os mais utilizados são: a rotação espectral, a restauração, imagem NDVI e o modelo linear de mistura espectral.

15.3.1 – Rotação Espectral

O objetivo das técnicas de rotação espectral é realizar transformações lineares nas imagens, envolvendo processamentos que combinam as informações espectrais coletadas nas várias bandas do sensor, para gerar novas imagens contendo informações espectrais mais contrastadas do que nas bandas originais. Essas transformações são realizadas “pixel a pixel” e não dependem da localização espacial dos dados. Para realizar a rotação espectral há dois tipos de transformações: componentes principais e análise canônica, sendo a transformação por componentes principais a de maior uso.

O uso de componentes principais visa, geralmente, reduzir a dimensionalidade dos dados. Em outras palavras, visa condensar as informações espectrais dos alvos, contidas em várias bandas do espectro eletromagnético, num número reduzido de bandas transformadas, sem perda de informações. Este procedimento é interessante, devido às limitações dos sistemas de classificação, que geralmente admitem para a análise espectral de um alvo, um número máximo de 3 ou 4 bandas espectrais.

Por outro lado, através de estudo de correlação, foi constatado que existe uma alta correlação entre as informações espectrais contidas nas bandas 4 e 5 (região do visível) e nas bandas 6 e 7 (infravermelho próximo) do MSS do Landsat. Essa correlação existe também nos dados espectrais contidos nas diferentes bandas do sensor TM do Landsat-5 e do ETM+ do Landsat-7. Neste caso, fica evidente que o analista pode utilizar um número menor de bandas espectrais e, sabendo que a radiação na faixa espectral do azul é bastante espalhada, pode eliminar esta banda, em certos tipos de estudos. O esquema da Figura 15.13 sintetiza o procedimento de transformação através das componentes principais.

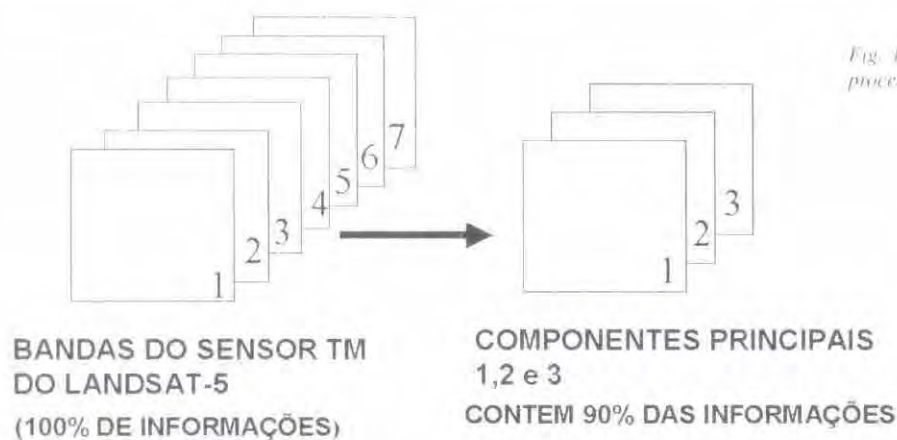


Fig. 15.13 – Esquema para ilustrar o processo de componentes principais

15.3.2 - Restauração

A restauração de imagem é uma técnica de correção radiométrica implementada no Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas – SPRING, cujo objetivo é corrigir as distorções inseridas pelo sensor óptico no processo de geração das imagens digitais.

Para realizar as correções radiométricas da imagem emprega-se um filtro linear. Os pesos do filtro linear de restauração são obtidos a partir das características do sensor, e não de forma empírica como é feito no caso de filtros tradicionais de realce.

A imagem resultante do processo de restauração pode ter o tamanho do “pixel” igual ou menor ao do “pixel” da imagem original. Nos trabalhos com vegetação, em especial com áreas agrícolas,

Após a decomposição dos dados originais nos componentes solo, vegetação e sombra são, então, aplicados os procedimentos de classificação, conforme será discutido no próximo item. Como exemplo, de aplicação do modelo linear de mistura espectral, podemos citar o acompanhamento de áreas desflorestadas na Região Amazônica. Neste caso, as imagens digitais do sensor TM do Landsat-5 são decompostas nos três componentes e, a imagem sombra é utilizada na classificação não-supervisionada, através do algoritmo ISOSEG. Através deste procedimento foi possível separar áreas desmatadas de áreas em estádios de recuperação e áreas cobertas com vegetação natural sem intervenção antrópica. Na Figura 15.16 são mostrados os resultados, do incremento de áreas desmatadas ente o período de 1997 a 1998, obtidos através deste procedimento.

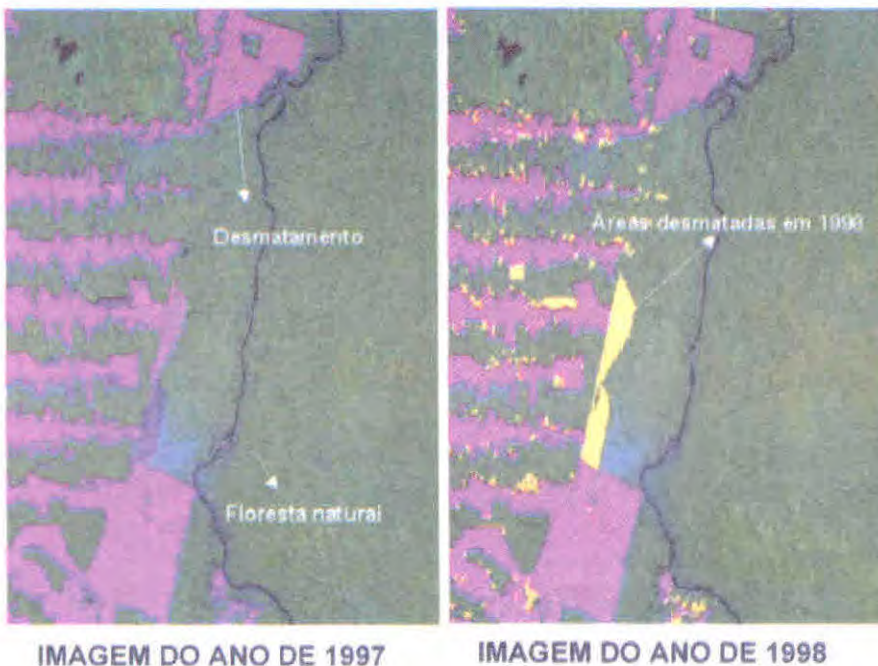


Fig. 15.16 – Imagem em composição colorida, nas bandas TM3(B), TM4(G) e TM5(R), para mostrar áreas desmatadas. Resultados obtidos através da aplicação do modelo linear de mistura espectral. FONTE: Duarte et al. (1999).

15.4 Sistemas de Classificação de Imagens Digitais

Durante a classificação de dados digitais, os alvos do universo real recebem a denominação genérica de classes ou classes temáticas. Em outras palavras, na classificação procura-se rotular cada “pixel” da imagem segundo a ocupação do solo, semelhante o que se faz na abordagem visual. Para tal, utilizam-se programas apropriados, também denominados algoritmos de classificação ou simplesmente classificadores. A categorização (rotulação) dos valores dos níveis de cinza é feita utilizando algoritmos estatísticos (programas computacionais) de reconhecimento de padrões espectrais. Dependendo do algoritmo utilizado, neste procedimento, a classificação é dita supervisionada ou não-supervisionada. O procedimento de classificação envolve duas fases distintas, ou seja, o treinamento e a classificação propriamente dita.

O treinamento consiste no reconhecimento da assinatura espectral de cada uma das classes de uso do solo da área imageada. Para alguns classificadores (algoritmos) esse reconhecimento envolve a obtenção de parâmetros estatísticos (média, matriz de covariância, etc) de cada classe contida na área. Para outros, o reconhecimento se faz através de procedimentos bastante simples, baseia-se apenas no nível mínimo e máximo de cinza na área fornecida para o treinamento. Dependendo de como o analista treina o sistema de classificação, ela é dita supervisionada ou não-supervisionada.

Tanto a classificação supervisionada quanto a não-supervisionada, possui regras de decisão para que o classificador associe um determinado “pixel” a uma determinada classe ou regiões de

similaridade de níveis de cinza. Tais regiões são baseadas nas características espectrais do "pixel", ou do "pixel" e seus vizinhos. Quando a regra de decisão toma, como base, as características somente do "pixel", a classificação é dita "pixel a pixel". Caso contrário, a classificação é dita por região.

Na classificação "pixel a pixel" após criar o conjunto de treinamento (características espectrais de cada uma das classes de ocupação do solo), o classificador procura associar um determinado "pixel" da imagem a uma das classes contidas no pacote de treinamento. Nesta situação, considera o "pixel" como uma entidade isolada e independente dos "pixels" que compõem o restante da cena.

Por outro lado, os classificadores por regiões utilizam, além da informação espectral do "pixel", a informação espacial desse "pixel" e de seus vizinhos. Na verdade, esses classificadores procuram simular o comportamento de um fotointérprete ao reconhecer áreas homogêneas dentro de uma imagem.

Em se tratando de treinamento é bom deixar claro que a classificação não-supervisionada utiliza algoritmos cujo reconhecimento de padrões espectrais se faz sem o treinamento tradicional, ou seja, sem fornecer parâmetros espectrais de cada uma das classes contidas na cena. Entretanto, não quer dizer que não haja participação do analista. Geralmente, esses algoritmos necessitam de alguns tipos de informações de entrada ("input") para que o sistema realize a classificação não-supervisionada.

15.4.1- Classificação Supervisionada

A classificação supervisionada, como foi mencionado acima, utiliza algoritmos cujo reconhecimento dos padrões espectrais na imagem se faz com base numa amostra de área de treinamento, que é fornecida ao sistema de classificação pelo analista. Dentre os algoritmos supervisionados os mais empregados são: máxima verossimilhança (MAXVER), o método do paralelepípedo e a distância euclidiana.

15.4.1.1- Máxima verossimilhança - MAXVER

Segundo Velasco et al. (1978), o problema da classificação de padrões é o de decidir a qual classe um determinado objeto (alvo) pertence, quando na área de estudo existem várias classes de ocupação do solo. Por exemplo, em imagem de satélite, digamos que as classes sejam tipos de culturas agrícolas e o objeto seja um ponto da imagem. Deseja-se saber, neste caso, qual a cultura que, muito provavelmente, foi plantada naquele ponto.

Um método usado para resolver este problema é o de determinar diversas "características" (atributos) quantificáveis dos objetos que possam diferenciar as várias classes. O passo seguinte consiste em tomar pontos, pertencentes às classes, e medi-los nas diversas características ou atributos espectrais. A partir destas medidas inferem-se as características do objeto a ser classificado com as características das diversas classes.

No caso das imagens de satélites, as características poderiam ser as medidas da luz refletida pelos diferentes alvos que compõem a cena e da área selecionada para o treinamento, em determinadas faixas espectrais do espectro eletromagnético. Geralmente, estas faixas espectrais são denominadas de bandas espectrais.

Na formulação estatística do problema assume-se uma densidade de probabilidade condicional $P(x/w_j)$, em que x é o conjunto de valores, nas diversas características, e w_j representa a j -ésima classe. Esta densidade de probabilidade condicional define a característica da classe.

Dado um objeto X_0 , uma possível regra de decisão é atribuir X_0 à classe w_j , cuja probabilidade condicional $P(W_j/X_0)$ seja máxima. Segundo a regra de Bayes tem-se:

$$P(w_j/x) = \frac{P(x/w_j)P(w_j)}{P(x)} \quad (15.6)$$

Onde; $P(x/w_j)$ e $P(x)$ são funções de densidade de probabilidade dos valores das características condicional e incondicional, respectivamente, referidas a w_j ; $P(w_j/x)$ e $P(w_j)$ são as probabilidades da classe w_j condicionada e incondicionada aos valores das características, respectivamente.

O cálculo de $P(w_j/x)$ pode ser simplificado calculando-se somente $P(x/w_j)P(w_j)$, pois $P(x)$ é o denominador de todas as classes. A quantidade $P(x/w_j)$, que é uma probabilidade, é chamada verossimilhança (“likelihood”) de w_j em relação a X . Uma regra de decisão simplificada é classificar o objeto X_0 como pertencente à classe w_j de maior valor de $P(x_0/w_j)$, ou seja, de “máxima verossimilhança” (maximum likelihood).

Como exemplo, supõe-se três classes W_1 , W_2 e W_3 com as seguintes funções de densidade de probabilidade, conforme mostrado na Figura 15.17.

Todos os pontos até X_1 seriam classificados, pela regra de máxima verossimilhança, como da classe 1; de X_1 a X_2 como pertencentes a classe 2, e entre X_2 e X_3 como pertencentes à classe 3; e acima de X_3 como da classe 2.

No MAXVER, a distribuição espectral, das classes de uso do solo, é considerada como tendo uma distribuição normal, ou seja, gaussianas. Em outras palavras, num talhão, por exemplo de milho, a variação na resposta espectral tem um comportamento gaussiano, isto é, muitas plantas de milho apresentarão respostas espectrais em torno da média. Para outras a resposta espectral será abaixo da média e para outras, ainda, a resposta espectral será acima da média. Assim, a densidade de probabilidade da distribuição normal multidimensional é:

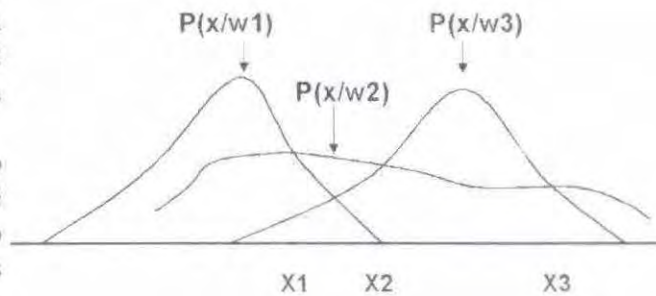


Fig.15.17 - Funções de densidade de probabilidade de três classes em uma dimensão.

$$P(X) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |C|^{1/2}} \text{EXP} (-1/2 (x - m)' C^{-1} (x - m)) \quad (15.7)$$

onde; x é um vetor n -dimensional, m é o vetor média (também n -dimensional), C é uma matriz quadrada $n \times n$, chamada matriz de covariância, $|C|$ é o determinante de C e C^{-1} e sua inversa.

Uma distribuição normal multivariável estará completamente especificada se forem determinados o vetor média m e a matriz de covariância C . Estes dois parâmetros podem ser estimados a partir de pontos X_1, X_2, \dots, X_n , da amostra de treinamento, através das fórmulas:

$$m = 1/n \sum X_i \quad (15.8)$$

$$C = 1/n \sum (x_i - m) (x_i - m)' \quad (15.9)$$

A fase de treinamento consiste em fornecer ao sistema um conjunto de “pixels”, representativos de cada alvo de ocupação do solo, existentes na imagem a ser classificada. Esse conjunto de “pixels” é adquirido através de um cursor de área que pode assumir formas retangular ou quadrática, de diferentes tamanhos, conforme é mostrado na Figura 15.18.

Fig. 15.18 – Imagem colorida das bandas TM3 (B), TM4(G) e TM5(R), para mostrar as áreas de treinamento obtidas para cada classe de ocupação do solo.



Observe, na Figura 15.18, que a cultura da soja apresenta dois comportamentos espectrais distintos (soja 1 e soja 2). Por esta razão, durante o treinamento deve-se criar duas subclasses de soja para que o sistema tenha maior opção em associar um determinado “pixel” a uma das classes contidas no pacote de treinamento. A mesma situação pode ocorrer para quaisquer outros alvos contidos na área imageada. Portanto, no procedimento de classificação, mais especificamente na fase de treinamento, as classes de uso do solo que apresentarem diferentes respostas espectrais, devem ser divididas em tantas subclasses quanto forem as variações observadas na área de estudo.

A partir desse pacote de treinamento, o classificador define o diagrama de dispersão das classes em torno de uma média e suas distribuições de probabilidades, considerando a distribuição normal.

O grande problema que se observa nesta fase da classificação é obter amostras de “pixels” puros, representativos de cada classe espectral. Como se sabe, a resposta espectral de um alvo contido numa área no terreno nunca é homogênea e exclusivamente daquele alvo. Geralmente, ela é mascarada pela resposta espectral proveniente da superfície de fundo ou de outros alvos dentro da área. Além disso, um mesmo tipo de alvo, principalmente, a vegetação, pode apresentar mais de um comportamento espectral em função de ataque de pragas e doenças, épocas de plantio, manchas de solo com deficiência de nutrientes, etc, provocando mudanças na quantidade de energia refletida. Outro problema bastante comum, no que diz respeito a áreas vegetadas, é a existência de vegetações diferentes porém com comportamentos espectrais semelhantes.

Ciente destes problemas, o que o analista procura, no momento de adquirir o conjunto de “pixels”, para que o classificador possa obter as estatísticas sobre uma determinada classe, é tentar selecionar amostras de áreas que sejam as mais representativas possíveis da classe em questão. Entretanto, devido à similaridade de respostas espectrais entre duas ou mais classes, embora tomando todas as precauções, pode acontecer que o conjunto de pontos (“pixels”) obtidos para uma classe, gere uma curva de distribuição de frequência que cruza com outra curva determinada para outra classe, conforme é ilustrado na Figura 15.19.

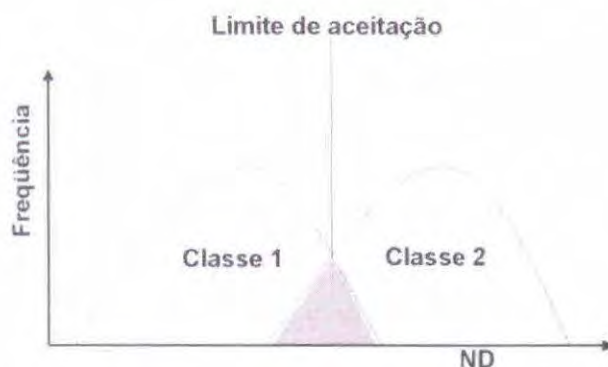


Fig. 15.19 – Esquema para mostrar a distribuição normal das classes 1 e 2.

Observe que as curvas de distribuição de frequência das classes 1 e 2 possuem uma certa quantidade de “pixels” (área achurada), cujas características espectrais são similares. Esses “pixels” podem ser classificados tanto como pertencentes à classe 1 como pertencentes à classe 2. Esta situação ocorre com frequência devido aos desvios do comportamento espectral da classe em relação a uma média. Esse tipo de ocorrência é comumente chamado de confusão de resposta espectral entre classes.

Existem duas possibilidades que o analista pode lançar mão para tentar resolver ou diminuir essa confusão entre classes. A primeira possibilidade consiste em fazer uma análise das amostras, de uma determinada classe em relação às demais classes, e eliminar aquelas amostras que apresentarem maiores erros de confusão (maior similaridade de resposta espectral), conforme é mostrado na Tabela 15.2.

Tabela 15.2 – Análise das amostras de áreas de florestas em relação às classes cerrado, rio e desmatamento.

Classes	Amostra		
	1	2	3
Floresta	90	50	87
Cerrado	5	50	0
Rio	5	0	0
Desmatamento	0	0	13

Analisando os valores contidos na Tabela 15.2 percebe-se que a amostra 1 contém 90% dos “pixels” corretamente rotulados na classe floresta. Desses “pixels”, 5% possuem características espectrais semelhantes aos “pixels” que foram rotulados como sendo cerrado, e 5% aos “pixels” rotulados como rio. Por outro lado, 50% dos “pixels” da amostra 2 são similares aos “pixels” que foram rotulados como sendo cerrado e 13% da amostra 3 são similares aos da classe desmatamento. Nesta situação, a primeira tentativa do analista seria eliminar a amostra 2 e redefinir as posições das amostras 1 e 3. Evidentemente que o analista poderia adquirir mais amostras de floresta. Feita esta tentativa, se o problema persistir, há ainda a possibilidade de aumentar o limiar de aceitação do classificador, ou seja, o limite de decisão. Para esclarecer o que foi dito, observe as curvas da Figura 15.20.

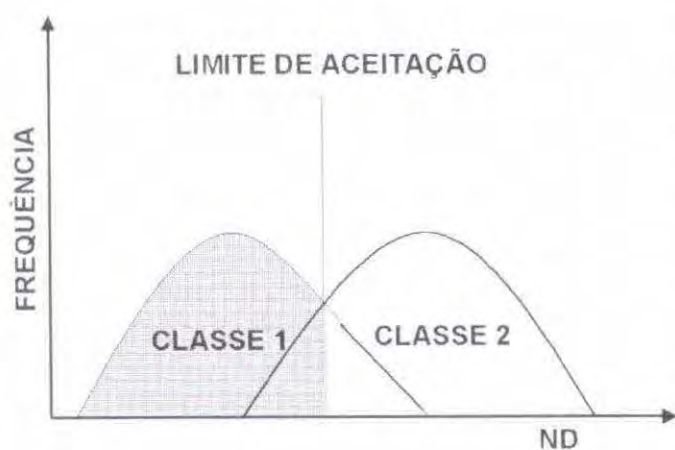


Fig.15.20 – Esquema da distribuição de frequência de “pixels” de duas classes imaginárias, para enfatizar o limite de aceitação.

O limiar de aceitação corresponde a uma restrição imposta pelo analista ao sistema de classificação, ou seja, indica a porcentagem de “pixels” da distribuição de probabilidade de uma classe que será classificada como pertencente a esta classe. Por exemplo, um limiar de 99% indica que, de todos os “pixels” da classe, 1% será ignorado (os de menor probabilidade).

No caso da Figura 15.20 todos os “pixels” da classe 2 que estiverem na área achurada, mesmo pertencendo à classe 2, serão classificados como sendo da classe 1. Este procedimento deve ser feito com certa cautela, pois se o limiar for muito grande o erro de classificação poderá ser expressivo.

A seguir, na Figura 15.21 é mostrada a seqüência de classificação utilizando o classificador MAXVER.

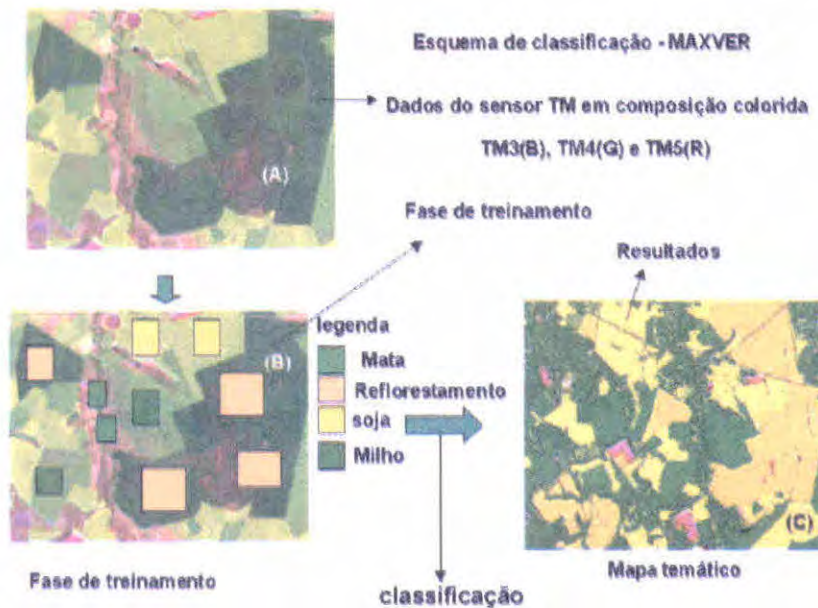


Fig.15.21 – Seqüência de classificação “pixel a pixel” através do classificador MAXVER.

15.4.1.2 – Método do Paralelepípedo

O método do paralelepípedo, também chamado de “single cell”, foi um dos primeiros classificadores desenvolvidos para reconhecimento de padrões espectrais em dados de satélites no formato digital.

Enquanto no MAXVER utiliza-se uma abordagem probabilística, para categorizar (classificar) um determinado “pixel” da imagem como pertencente a uma determinada classe, no método do paralelepípedo a abordagem de classificação é determinística. Neste caso, o “pixel” é associado a uma determinada classe quando os valores dos níveis de cinza, desse “pixel” nas três bandas utilizadas na classificação, estiverem contidos nos intervalos de níveis de cinza determinados para cada banda, na área fornecida pelo analista para treinamento do sistema. Em outras palavras, suponha que o analista deseje classificar as áreas de pastagens dentro de um município utilizando dados orbitais. Com o cursor o analista adquire uma área de treinamento, dentro de uma área na imagem da qual ele tem certeza ser uma pastagem. O classificador obtém, desta área de treinamento, o range de variação de níveis de cinza (valor mínimo e máximo), para cada banda espectral utilizada na classificação. Em seguida, começa a analisar os demais “pixels” da área de estudo em relação ao pacote de treinamento. Se os valores dos níveis de cinza do “pixel” satisfizerem a condição de “pertencer” a cada um dos intervalos estabelecidos no treinamento para a classe pastagem, então, o “pixel” é rotulado como sendo pastagem. Caso contrário, ele não é classificado.

No MAXVER o analista fornece ao sistema informações espectrais de todos os alvos contidos na área de estudo. Para cada alvo é criada uma classe espectral. O conjunto dessas áreas selecionadas para o treinamento, recebe a denominação de pacote de treinamento, que será a base para criar um modelo de decisão, a ser utilizado durante a classificação. No método do paralelepípedo o treinamento é feito somente para uma classe de uso do solo de cada vez.

Como exemplo do que foi dito acima, supõe-se que numa área de estudo existam quatro distintos alvos de ocupação do solo: soja, milho, reflorestamento e água. No MAXVER o analista pode criar

quatro classes espectrais como treinamento para o classificador, uma classe espectral para cada um dos alvos da cena. No método do paralelepípedo o analista treina o classificador apenas para uma classe de cada vez.

No método do paralelepípedo, o treinamento é feito, inicialmente, com o analista elegendo uma determinada classe como sendo a primeira a ser classificada, ou seja, ele prioriza a classe a ser classificada.

Supondo que o analista tenha escolhido a cultura da soja como sendo a primeira cultura a ser classificada. Sobre um talhão que seja bem representativo da cultura da soja ele obtém uma amostra de área. A partir desta amostra, o classificador determina o maior e o menor nível de cinza existente dentro da área amostrada, ou seja, determina o intervalo de níveis de cinza, em cada uma das bandas espectrais utilizadas na classificação.

Obtidos os intervalos de níveis de cinza, o passo seguinte é analisar um determinado “pixel” em relação ao pacote de treinamento. A regra de decisão, neste caso, pode ser entendida com base na teoria de conjunto, conforme é mostrado no exemplo da Figura 15.22, que contém uma imagem em composição colorida, e as três bandas que deram origem a esta composição. Os dados utilizados no exemplo da Figura 15.22 foram obtidos pelo sensor TM do Landsat.

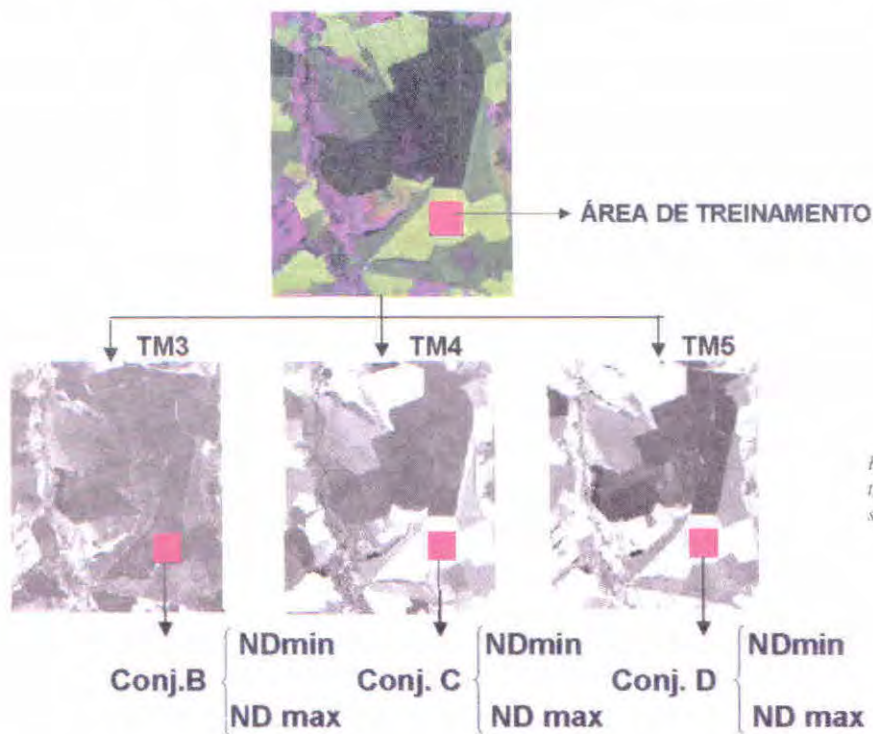


Fig. 15.22 – Esquema para mostrar a fase de treinamento do classificador paralelepípedo.

O conjunto de todos os “pixels”, que contêm a cultura da soja, foi denominado de ConjA. A amostra de área utilizada para o treinamento do classificador, selecionada sobre um talhão de soja no conjunto A, deu origem a três subconjuntos de “pixels” correspondentes as três bandas espectrais. Logo temos:

Conj.A = {valores dos níveis de cinza de todos os “pixels” da cultura da soja na cena do satélite, universo populacional}

SubConj. B = {Valores dos níveis de cinza dos “pixels” da cultura da soja contidos na amostra de área, na banda TM3}

SubConj C = {Valores dos níveis de cinza dos “pixels” da cultura da soja contidos na amostra de área, na banda TM4}

SubConj D = {Valores dos níveis de cinza dos “pixels” da cultura da soja contidos na amostra de área, na banda TM5}. Assim,

ConjA \subset SubconjB; SubconjC e o SubconjD

onde: “ \subset ” = contém e “ \supset ” = está contido

Um determinado “pixel” (X) da imagem será classificado como sendo soja (pertencente ao conjunto A), se o valor do nível de cinza dele satisfizer as seguintes condições matemáticas:

Se $X \supset$ SubConjB; $X \supset$ SubConjC; $X \supset$ SubConjD $\Rightarrow X \subset$ Conj A

Nesta situação o “pixel” será classificado como sendo de soja.

É importante salientar que o valor do nível de cinza do “pixel” tem que estar contido dentro dos três subconjuntos B,C e D.

15.4.2 – Classificação Não-Supervisionada

O uso de classificadores não-supervisionados é indicado quando o analista não possui conhecimento, *a priori*, da área de estudo, embora nada impeça que esta abordagem possa ser usada mesmo conhecendo a área. Neste sentido, o intuito é eliminar a subjetividade no processo de obtenção das amostras de áreas, para criar o pacote de treinamento, como indicado no processo supervisionado.

Na abordagem não-supervisionada, mesmo sendo considerado um procedimento em que não há interação do analista e o sistema, na fase de treinamento, certos algoritmos necessitam de alguns parâmetros que devem ser fornecidos ao sistema.

Dentre estes algoritmos tem-se o classificador K-Médias, no qual o analista fornece ao sistema três parâmetros: a) o número de classes espectrais prováveis dentro da área de estudo; b) a distância mínima desejada entre os valores dos níveis digitais de duas classes, isto é, a diferença mínima de nível de cinza para considerar um pixel como pertencente a uma classe ou outra e c) número de iterações realizadas, ou seja, quantas vezes o classificador deve repetir a operação de análise do “pixel” em relação aos atributos das classes contidas na área. A partir desses parâmetros de entrada, citados em a, b e c, o sistema realiza o agrupamento (“clustering”) dos “pixels” homogêneos em n classes espectrais.

Outro classificador não-supervisionado e que está sendo muito utilizado no SPRING é o classificador ISOSEG. Este classificador não requer nenhum parâmetro inicial para começar o agrupamento dos “pixels” em regiões homogêneas. A princípio ele assume que todos os “pixels” da cena pertencem a uma única classe. Posteriormente, começa a dividir a cena em diferentes classes, segundo as diferenças espectrais observadas nos “pixels”.

Quase todos os classificadores não-supervisionados têm como regra de decisão a distância mínima entre o valor do nível digital do “pixel” e o valor médio dos números digitais das classes espectrais contidas na área de estudo. Um dos métodos estatísticos utilizados no cálculo desta distância do “pixel” em relação às médias das classes é a distância euclidiana. Considerando um espaço n -dimensional, o cálculo é feito por:

$$d(x,m/w) = \sum_{i=1}^n ((x_i - m_i)^2)^{1/2} \quad (15.10)$$

onde: $d(x, m/w)$ é a distância euclidiana entre o "pixel", x é a média da classe w , x_i e m_i são as componentes do vetor que fornecem a posição do ponto no espaço de atributo e n é a dimensão do espaço de atributo (número de bandas espectrais).

Assim, o treinamento procura caracterizar cada "pixel" de forma que as distâncias entre os atributos dos "pixels" de um agrupamento (classe) sejam mínimas, porém, entre agrupamentos, as distâncias entre os atributos espectrais dos "pixels" sejam máximas. Isto equivale a dizer que o critério para se realizar o agrupamento dos dados em torno das classes é o de minimizar a soma dos erros quadráticos.

15.4.3 – Classificadores Por Regiões

Os classificadores por regiões utilizam, como critério de decisão, a informação espectral de cada "pixel" da imagem e a informação espacial que envolve a relação entre o "pixel" e seus vizinhos. Estes classificadores procuram simular o comportamento de um fotointérprete, ao reconhecer áreas homogêneas nos dados orbitais, baseados nas propriedades espectrais e espaciais dessas áreas na imagem. A informação de borda é utilizada inicialmente para separar regiões; e as propriedades espaciais e espectrais agrupam áreas com mesma textura. A classificação por regiões é dividida em fases, ou seja, *segmentação, extração de regiões, classificação e mapeamento*.

15.4.3.1 – Segmentação de Imagem

Vimos que na classificação supervisionada e não-supervisionada, os procedimentos de análise dos "pixels" baseiam-se unicamente nos atributos espectrais do "pixel". Além disso, no caso da classificação supervisionada o treinamento é muito subjetivo, porque é feito segundo um critério estabelecido pelo analista. Isto, pode gerar um pacote de treinamento que não contenha todas as variações possíveis dos atributos espectrais de uma determinada classe de ocupação do solo.

A segmentação de imagem é um procedimento adotado antes da fase de classificação, que tenta solucionar o que foi dito no parágrafo anterior, sobre a subjetividade na aquisição do pacote de treinamento. Através desse procedimento, a imagem é dividida em regiões espectralmente homogêneas, na qual, algumas dessas áreas são utilizadas como treinamento do classificador. Os processos utilizados para dividir a imagem, em regiões espectralmente homogêneas, implementados no SPRING são três: a) crescimento de regiões; b) detecção de bordas e 3) combinação destes dois (INPE, 2000). Para áreas agrícolas e áreas de vegetação natural, como na região amazônica, o segmentador utilizado no INPE, é o de crescimento por regiões, que tem mostrado bom desempenho na segmentação. Por essa razão, neste capítulo foi discutido apenas este segmentador. Maiores informações sobre os outros procedimentos de segmentação podem ser encontradas em INPE (2000).

A segmentação por crescimento de regiões é uma técnica em que somente as regiões espacialmente adjacentes são agrupadas segundo algum critério de similaridade (INPE, 2000).

No início do processo de segmentação a região pode ser um "pixel" ou um conjunto de "pixels". Segundo INPE (2000), para cada região o segmentador calcula os seguintes atributos espectrais: média, variância e textura. A agregação das regiões é feita segundo os critérios de similaridade e de área, que são fornecidos pelo analista.

O limiar de similaridade é o valor mínimo abaixo do qual duas classes são consideradas similares e agrupadas em uma única região, enquanto que o limiar de área defini o número mínimo de "pixels" necessários para que uma área seja individualizada. O resultado dessa segmentação é expresso por uma matriz de N polígonos, conforme é mostrado na Figura 15.23.

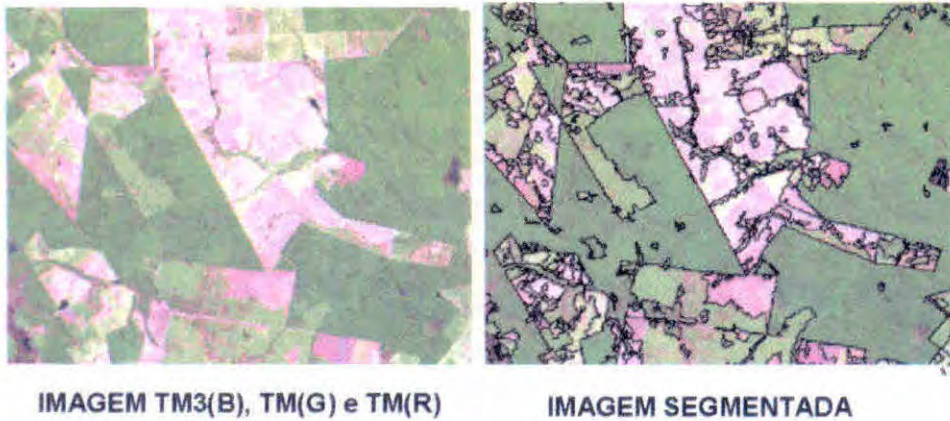


Fig.15.23 – Imagem em composição colorida sem segmentação (a esquerda) e a imagem segmentada a direita.

15.4.3.2 – Extrações de Regiões

Esta etapa consiste em extrair as informações de média, variáveis de cada região, para cada banda considerada no processo de classificação. (Bins et al, 1993).

15.4.3.3 – Classificação

A classificação por regiões consiste em identificar e rotular, como uma classe, os polígonos que apresentam mesma similaridade de níveis de cinza. Para cada classe o algoritmo atribui uma cor específica.

Para realizar a classificação o analista tem a opção de dois classificadores: o *BHATTACHARYYA* e o *ISOSEG*. Para mapeamento de áreas com vegetação (floresta e agricultura) o algoritmo mais utilizado tem sido o *ISOSEG*.

O Bhattacharya usa as amostras de treinamento para estimar a função densidade de probabilidade para as classes apontadas no treinamento. Em seguida, avalia, para cada região, a distância de Battacharrya entre as classes (Equação 15.11). A classe que apresentar a menor distância será atribuída à região avaliada.

$$B(p_i, p_j) = 1/2 (m_i - m_j)^T \Sigma (m_i - m_j) + 1/2 \ln \frac{|\Sigma|}{|\Sigma_i|^{1/2} |\Sigma_j|^{1/2}} \quad (15.11)$$

onde: m_i é a média da classe i ; m_j é a média da classe j ; T é a matriz transposta; \ln é o logaritmo neperiano; i e j são as classes dentro do contexto.

O classificador *ISOSEG* é um algoritmo de agrupamento de dados não-supervisionado, aplicado sobre o conjunto de regiões que foram caracterizadas por seus atributos estatísticos (média e matriz de covariância), na fase de extração de regiões. Em outras palavras, é uma técnica para classificação que procura agrupar regiões, a partir de uma medida de similaridade entre elas. A medida de similaridade utilizada consiste na distância de Mahalanobis (Equação 15.12) entre a classe e as regiões candidatas à relação de pertinência com esta classe.

$$D = 1/2 (X - M_i)^T C_i^{-1} (X - M_i) \quad (15.12)$$

Onde, T é matriz transposta; C_i é a matriz de covariância; M_i vetor média da classe i ; X é a região que está sendo analisada.

O ISOSEG utiliza a matriz de covariância e o vetor média para estimar o valor central de cada classe. Este algoritmo resume-se em três etapas: *definição do limiar*, *deteção das classes* e *competição entre classes*.

- **Definição do limiar:** o usuário define um limiar de aceitação, dado em percentagem. Este limiar por sua vez define uma distância de Mahalanobis, de forma que todas as regiões pertencentes a uma dada classe estejam distantes da classe por uma distância inferior a esta. Quanto maior o limiar, maior esta distância e, conseqüentemente, maior será o número de classes detectadas pelo algoritmo.

- **Deteção das classes:** Nesta fase, as regiões são ordenadas em ordem decrescente de área e inicia-se o procedimento para agrupá-las em classes. Serão tomados como parâmetros estatísticos de uma classe (média e matriz de covariância), os parâmetros estatísticos da região de maior área que ainda não tenha sido associada à classe alguma. Em seguida, associam-se a esta classe todas as regiões cuja distância de Mahalanobis for inferior à distância definida pelo limiar de aceitação.

Assim, a primeira classe terá como parâmetros estatísticos aquelas regiões com maior área. As classes seguintes terão parâmetros estatísticos de média das regiões de maior área, que não tenham sido associadas a nenhuma das classes previamente detectadas. Esta fase repete-se até que todas as regiões tenham sido associadas a alguma classe.

- **Competição entre classes:** as regiões são reclassificadas, considerando-se os novos parâmetros estatísticos das classes, definidos na etapa anterior. O parâmetro estatístico (média de cada classe) é então recalculado. O processo repete-se até que a média das classes não se altere (convergência).

Ao término, todas as regiões estarão associadas a uma classe definida pelo algoritmo. O usuário deverá então associar estas classes (denominadas temas, no SPRING) às classes por ele definidas no banco de dados, na opção Arquivo-Esquema Conceitual. Na Figura 15.24 é mostrado o resultado de uma classificação realizada através do ISOSEG, para mapeamento de uso do solo na região da Amazônia.

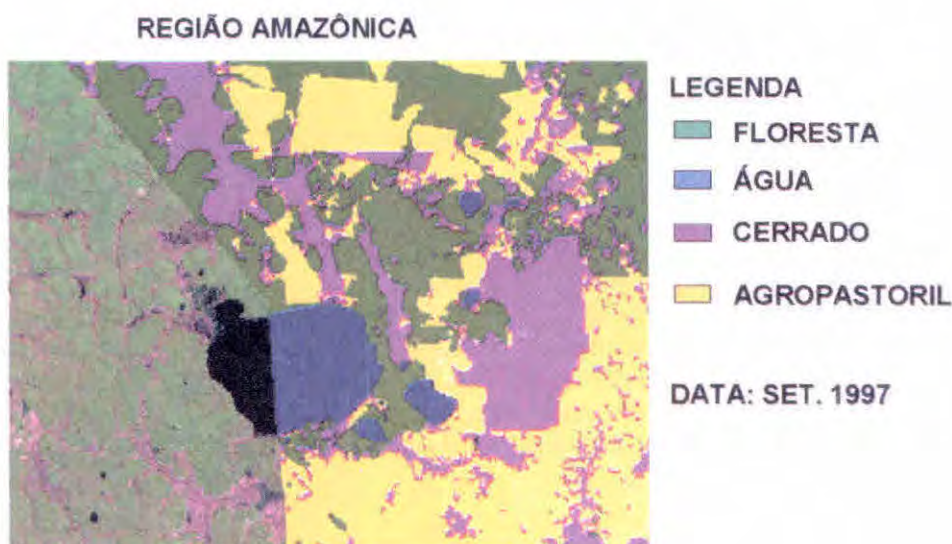


Fig. 15.24 – Resultados de classificação do uso do solo, realizado através do ISOSEG.

Bibliografia

- Ahern, F.J. **Basic concepts of imaging radar. Intensive Course**, São José dos Campos:INPE, 1994.
- AGEMA-infrared systems: **Manual do operador**, Secaucus, NJ. 1987. 58p.
- Al-Abbas, A.H.; Swain, P.H.; Baumgardner, M.F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. **Soil Science**, v.114, n.6, p.477-485, 1972.
- Al-Abbas, A.; Barr, H.R.; Hall, J.D.; Crane, F.L.; Baumgardner, M.F. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. **Agronomy Journal**, v.66,n.1., p.16-20, 1974.
- American Society of Photogrammetry: **Manual of Photographic Interpretation**. 1960. Falls Church: Sheridan Press, 1960.
- Aranoff, S. The minimum accuracy value as an index of classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.51, n.1, p. 99-111, 1985.
- Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v.76,n.2, p.300-306, 1984.
- Asrar, G.; Kanemasu, E. T.; Jackson, R. D. and Pinter, P. J. Estimation of total above ground phytomass production using remote sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.17,n.3, p.211-220, 1985.
- Assunção, G.V.; Duarte, V. **Avaliação de Áreas Preparadas para Plantio (SOLONU), Utilizando-se dados digitalizados do LANDSAT através de tratamento automático no I-100**. São José dos Campos, INPE, Setembro de 1980. (INPE-1910-RPE/243).
- Assunção, G.V. **Sensoriamento remoto na Agricultura: Conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos, abril de 1989. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (INPE-4806-MD/39).
- Assunção, H. F. da. **Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global em Piracicaba-SP**. Piracicaba, 1994, 57p. Dissertação (M.S.) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- Baret, F.; Guyot, G.; Major, D. J. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. **Photogrammetry and Remote Sensing**, v.43, n. 5, p.241-56, 1989.
- Baret, F.; Guyot, G. Potentials : limits of vegetation indices for LAI ; APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n. 2-3, p.161-73, 1991

- Barros, C. **Os seres vivos: Origem da vida Programas de saúde Ecologia**. Ed. 44, editora ática, São Paulo, 1995. 176p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e Fertilidade do solo. EPE.
Levantamento semidetalhado dos solos de áreas do Ministério da Agricultura no Distrito Federal. Rio de Janeiro, Convênio MA/CONTAP/USAID/BRASIL., 1969. 135p. (Boletim Técnico, 8).
- Bauer, M.E. **The role of remote sensing in determining the distribution ; yield of crops**, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1975. (LARS Technical Report 122075).
- Bauer, M.E.; Vanderbilt, V.C.; Robinso, B.F.; Daughtry, S.F. Spectral properties of agricultural crops ; soils measured from space, aerial, field ; laboratory sensors. In: Congress of International Society of Photogrammetry, 14., **Proceedings**, Hamburg, West Germany, 1980. p 56 -73.
- Beck, R.II.; Robinson, B.F.; Mcfee, W.W.; Peterson, J.B. **Spectral characteristics of soil moisture, organic carbon, and clay content**. Purdue University West Lafayette, IN, 1976 (LARS Information Note, 081176).
- Beiser, A. **Conceitos de física moderna**. Tradução: Gita, K.G. São Paulo, Polígono e editora da Universidade de São Paulo, 1969. 460p.
- Bernardes, M. S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: Castro, P.R. Ecologia da produção agrícola, Piracicaba: **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, 1987. 249p.
- Boumgardner, M.F.; Kristof, S.J.; Jahannsen, C.J.; Zaehary, A. L. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. **Proceedings of the Indiana Academy of Science**, v.79, p. 413-422. 1970.
- Bowman, W. D. The relationship between leaf water status, gas exchange, ; spectral reflectance in cotton leaves. **Remote Sensing of Environment**, v.30, n. 3, p.249-55, 1989.
- Bowker, D.E.; Davis, R.E.; Myrik, D.L.; Jones, W.J. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies**. National Aeronautics and Space Administration, NASA, 1985. 184p. (Reference Publication, 1139).
- Bowers, S.A.; Hanks, R.J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, v.100, n.2, p.130-138. 1965.
- Cabral, A.P.; Mantovani, J.E.; Costa, M.P.F., De Lima, R.F.; Novo, E.M.L. Efeitos da concentração e da granulometria na assinatura espectral do material particulado inorgânico em suspensão. IN: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Manaus, **Anais**, São José dos Campos:INPE, v.2, p.496-504, 1990.
- Câmara Neto, G. ; Casanova, M.A.; Hemerly, A. S.; Magalhães, G.C.; Medeiros, C.M.B. **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. IV Escola de computação Campinas: Unicamp, 1996. 193p.
- Carder, K.L.; Steward, R.G.; Harvey, G.R.; Ortner, P.B. Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll concentration. **Limnology and Oceanography**, v.34, n.1, p.68-81. 1989.
- Cardoso, P.C.S.; Ponzonei, F. J. Considerações sobre a caracterização espectral de folhas extraídas de cinco diferentes espécies. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 1996.
- Carter, G.A. Primary ; secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, v.78, n.7, p.916-24, 1991

- Cervelle, B. Réflexion de la lumière solaire par les matériaux minéraux: quelques éléments. In: *Journées Télédétection: Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales*. **Bondy**, v.11, p 14-17, 1988.
- Chen, C. S.; Tardin, A. T.; Batista, G. T. **Índices de vegetação e suas aplicações na agricultura**. São José dos Campos, 1986. 24p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (INPE-3912-MD/030).
- Chipman, R. International cooperation in the acquisition and dissemination of satellite remote sensing data. In: **FAO – Food and agriculture Organization of the United Nations**. Rome, 1990. p 11-26
- Choudhury, B.J. Relationships between vegetation indices, radiation ; net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. **Remote Sensing of Environment**, v.22, n.2, p.209-34, 1987.
- Clevers, J.G.P.W. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing Environment**, v.29, n.1, p.25-37, 1989.
- Cipra, J.E.; Baumgardner, M.F.; Stoner, E.R.; MacDonald, R.B. Measuring radiance characteristics of soil with a field spectroradiometer. **Soil Science Society of America. Proceedings**. v.35. p.1014-1017, 1971.
- Colwell, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.3, n.3, p.175-183. 1974.
- Congalton, R.G. A comparison of sampling scheme used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n.5, p. 593-600, 1988.
- Congalton, R.G.; Mead, R.A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, n.1, p.69-74, 1983.
- A review of assessing the accuracy of classifications of remote sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.1, p.35-46, 1991.
- Cruz, D. **Ciências e Educação Ambiental**. Editora Ática, ed. 20, São Paulo, 1997. 208p.
- Dainelli, P. Photointerpretation criteria for Land-Resources studies. In: **Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO)**. Roma: FAO, 1990. P. 19-26. (RSC Series 54).
- Dainise, R.C.; Moreira, M.A.; Rudorff, B.F.T; Campos, S. -Características espectrais dos cultivares de IAC-24 e IAC-287, quando submetidos a diferentes níveis de irrigação e adubação nitrogenada. In: *GisBrasil 2000, Salvador - BA, Anais*. Salvador 7 a 11 de agosto de 2000
- Daughtry, C.S.T.; Vanderbilt, V.C.; Pollara, V.J. Variability of reflectance measurements with sensor altitude ; canopy type. **Agronomy Journal**, v.74, n.4, p. 744-751, 1982.
- Daughtry, C. S. T.; Gallo, K. P.; Bauer, M. E. Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies. **Agronomy Journal**, v.75, n.3, p.527-531, 1983.
- Daughtry, C.S.T.; Gallo, K.P.; Goward, S.N.; Prince, S.D.; Kustas, W.P. Spectral estimates of absorbed radiation ; phytomass production in corn ; soybean canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.39, n.2, p.141-52, 1992.
- Darnell, J.; Lodish, H. ; Baltimore, D. **Molecular all biology**. W.H. Freeman & Comp, New York. 1990. 1104 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos da margem esquerda do rio São Francisco, Estado da Bahia**. Recife, Convênio

- EMBRAPA/SNLCS-SUDENE/DRN, MA/USAID/ETA. 1977, 1296p. (Boletim Técnico, 52).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Mapa de Solos do Brasil**. 1981. Escala 1:5.000.000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, RJ. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. Iv.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília : Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro : **Embrapa Solos**. 412p. 1999.
- Epiphânio, J.C.N. Metodologia de aquisição de dados ao nível terrestre. In: Assunção, G.V. **Sensoriamento Remoto na Agricultura: Conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos, abril 1989. p. 53-73. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (INPE-4806-MD/39)
- Epiphânio, J.C.N.; Formaggio, A.R.; Valeriano, M.M.; Oliveira, J.B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos, junho de 1992. 132p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (INPE-5424-PRP/172).
- Esteves, F.A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro, Interciência, FINEP, 575p. 1988.
- Fitzpatrick-Lins, K. Comparison of sampling procedures and data analysis for a land-use and land-cover map. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.47, n.3, p. 343-351, 1981.
- Formaggio, A.R. **Comportamento espectral de alvos-solos**. Apostila do Curso de Comportamento Espectral de Alvos, do 13. Curso Internacional de Sensoriamento Remoto no INPE. São José dos Campos: 1999. 21p.
- Gallo, K.P.; Daughtry, C.S.T.; Bauer, M.F. spectral estimation in corn canopies. **Agronomy Journal**, v.78, n.5, p.752-56, 1985
- Gallo, K. P.; Daughtry, C. S. T.; Wieg, C. L. Errors in measuring absorbed radiation : competing crop radiation use efficiency. **Agronomy Journal**, v.85, n.6, p.1222-1228, 1993.
- Gates, D.M.; Keegan, H.J.; Chleter, J.C.; Weidner, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v.4, n.1, p.11-20, 1965.
- Gardner, P.F.; Pearce, R.B.; Mitchell, R.L. **Physiology of crop plants**. Iowa: Iowa State University Press, 1985. 337p.
- Gausman, H. W.; Allen, W. A. Optical parameters of leaves of 30 plant species. **Plant Physiology**, v.52, n.1, p.57-62, 1973.
- Gausman, H. W.; Escobar, D.E.; Rodriguez, R.R. Effect of stress ; pubescence on plant leaf : canopy reflectance. In: International Symposium on Remote Sensing for Observation; Inventory of Earth Resources; the Endangered Environment. **Proceedings**. Freiburg, F.R.G. 2-5 July, v.23, p. 719-749, 1978.
- Gausman, H,W. Leaf reflectance of near-infrared. . **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.51,n.11, p.1725-1734, 1985.
- Ginevan, M.E. Testing land use map accuracy: another look. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.45,n.10, p.1371-1377, 1979.
- Godoy Jr., M.;Novo, E.M. **Processamento digital de dados TM/Landsat no monitoramento de**

- águas interiores. São José dos Campos:INPE, 1989. 26p. (INPE-4956-PRE/1533).
- Gong, P.; Howarth, P.J. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.56, n.5, p. 597-603. 1990.
- Goward, S.N.; Huemmrich, K.F. Vegetation canopy PAR absorptance ; the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v.39, n.2, p.119-140. 1992.
- Guyot, G.; Guyon, D.; Riou, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v.4, n.3, p.3-18. 1989.
- Guyot, G. Optical properties of vegetation canopies. In: Steven, M.D.; Clark, J.A., ed. **Applications of Remote Sensing in Agriculture**. London: Butterworths, 1990. cap. 2, p. 19-43.
- Green, C.F. Nitrogen nutrition ; wheat growth in relation to absorbed solar radiation. **Agricultural and Forest and Meteorology**, v. 41, n. 3-4, p.207-248, 1987.
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v.35,n.1,p.11-27, 1991.
- Hatfield, D.L.; Kanemasu, E.T.; Asrar, G.; Jackson, R.D.; Pinter Jr., P.J.; Reginato, R.J.; Idso, S.B. Leaf area estimates from spectral measurements over various planting data of wheat. **International Journal Remote Sensing**, v.6, n. 1, p.167-175, Jan.1985.
- Hatfield, D.L.; Asrar, G.; Kanemasu, E.T. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.14, n.1-3, p.65-75. 1984.
- Hay, A.M. Sampling designs to test land-use map accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.45, n.4, p.529-533, 1979.
- The derivation of global estimates from a confusion matrix. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, n.8, p.1395-1398, 1988.
- Hipps, L. E.; Asrar, G.; Kanemasu, E.T. Assessing the intereception of photosynthetically active radiation in winter wheat. **Agricultural and Meteorology**, v. 28, n. 3, p.253-59, 1983.
- Hoffer, R.M. Biological ; physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensing data. In: Swain, P.H. ; Davis, S. M., ed. **Remote Sensing the Quantitative Approach**, New York: McGraw Hill. 1978. cap.5, p. 228-89.
- Hoffer, R.M.; Johannsen, C.J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: Johnson, P.L. **Remote Sensing in Ecology**. Ed. Univ. of Georgia Press, Athens, G.A. 1969. p. 1-16.
- Horler, D.N.H. Barber, J.; Barringer, A. R. Effect of heavy metals on the absorbtance ; reflectance spectra of plants. **International Journal of Remote Sensing**, v.1, n.2, p.121-36. 1980.
- Horler, D.N.H.; Dockray, M.; Barber, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v.4, n.2, p.273-88. 1983.
- Holben, B.N.; Tucker, C.J.; Fan, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.46, p.651-656. 1980.
- Huete, A. R.; Escadafal, R. Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques. **Remote Sensing of Environment**, v.35: p.149-159. 1991.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W. Visible and infrared spectra of minerals and rocks In: **Silicate Minerals Modern Geology**, v.1, p. 283-300. 1970.
- Hunt, E.R.; Rock, B.N. Detection of changes in leaf water content using near- ; middle-infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n.1, p.43-54, 1989.

<http://makalu.jpl.nasa.gov/html/aviris.overview.html>

<http://www.cers.nrcam.gc.ca/cers>

<http://makalu.jpl.nasa.gov/html/aviris.instrument.html>

<http://www.soils.umn.edu/~pgowda/MRCC/sld006.htm>

<http://www.soils.umn.edu/~pgowda/MRCC/sld006.htm>

- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Relatório de atividades – 1995**. São José dos Campos: INPE. 1995. 43p.
- INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**. 2001. 20p.
- Ipoliti-Ramilo, G.A. **Imagens TM/Landsat-5 da época de pré-plantio para a previsão da área de culturas de verão**. São José dos Campos. 183p. (INPE-7116-TDI/688). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1999.
- Jackson, R.D.; Pinter, Jr, P.J.; Idso, S.B.; Reginato, R.J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation ; azimuth angle. **Applied Optics**, v.18, n.22, p.3730-3731. 1979.
- Jackson, R. D.; Huete, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v.11, p.185-200. 1991.
- Johannsen, C.J. **The detection of available soil moisture by remote sensing techniques**. Purdue University West Lafayette, IN. 1969. (Ph. D. Thesis).
- Kollenkark, J. C.; Vanderbilt, V. C.; Bauer, M. E.; Housley, T. L. Effect of cultural practices on agronomic ; reflectance characteristics of soybean canopy. **Agronomy Journal**, v.74, n.4, p.751-58. 1982.
- Knipling, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3, p.155-59, 1970.
- Kumar, M. and Monteith, H.L. Remote sensing of crop growth. In: **Plants and Daylight Spectrum**. New York: H. Smith, 1981. p.133-44.
- Lincoln - LA1-2000: **plant canopy analyzer: manual de operação**. Lincoln, Nebraska, 1992.
- Landis, J.R.; Koch, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33,n.1,p.159-174, 1977.
- Landsat: From the past to the future – Special anniversary Poster** . In:EOSAT: Earth Observation Satellite Company, Jul. 1992.
- Leblon, B.; Guerif, M.; Baret, F. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency ; biomass production of flooded rice. **Remote Sensing of Environment**, v.38,n.2,p.147-58, Nov. 1991.
- Lemos, R. C. ; Santos, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Campinas. SBCS/SNLC/S, 1984. 45p.

- Lepsch, J.E. **Solos – Formação e conservação**. Ed. Universidade de São Paulo, Brasília, INL... 1976. 160p.
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1987. 721p.
- Lindberg, J.D.; Snyder, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. **American Mineralogist**, v.57, p. 485-493, 1972.
- Lucchesi, A.A. Fatores da produção vegetal. In: Castro, P.R.C. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba. **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, 1987. 249p.
- Ma, Z.; Redmond, R.L. Tam coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.61,n.4,p.453-459, 1995.
- Machado, E. C. Eficiência fotossintética. In: SEMINÁRIO DE BIOTECNOLOGIA AGRÍCOLA, Piracicaba, 1985. **Anais**. Piracicaba, FEALQ, 1985. p 175-200.
- Madeira Netto, J.S.M. **Étude quantitative des relations constituants mineralogiques réflectance diffuse des latosols brésiliens/application à l'utilisation pedologique des données satellitaires TM (region de Brasília)**. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris. 1991. 224p.
- Magalhães, A.C.N. Fotossíntese. In: Ferri, M.G., ed. **Fisiologia vegetal**. São Paulo, Editora Peagógica e Universitária, EDUSP, 1985. P.117-166.
- Mantovani, J.E. **Comportamento espectral da água: faixas de maior sensibilidade do fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada**. São José dos Campos, 98p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.
- Markham, B.L.; Barker, J.L. **Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at satellite temperatures**. Lanham:EOSAT, 1986. 21p. (Landsat Technical Notes n 1).
- Mascarenhas, N.D.A.; Velasco, F.R.D. **Processamento de imagens**. São José dos Campos:INPE, 1984. 315p. (INPE-3325-PRE/624).
- Mather, P.M. **Computer processing of remote sensed images: an introduction**. Chichester:Wiley, 1987. 325p.
- Mendonça, F. J.; Lee, D.C.L.; Tardin, A.T.; Shimabukuro, Y.E.; Chen, S.C.; Lucht, L.A.M.; Moreira, M.A.; Lima, A.M.; Maia, F.C.S. **Levantamento da área canavieira do Estado de São Paulo utilizando dados do Landsat ano safra 1979/80**. São José dos Campos:INPE, mar. 1981. (INPE-2021-RPE/288).
- Merva, G.E. **Physical principles of the plant biosystem**. St Joseph, MI, ASAE. East Lansing, MI, 1995. 72p.
- Montgomery, O. L. **An investigation of the relationship between spectral reflectance and the chemical, physical, and genetic characteristics of soils**. Purdue University West Lafayette, IN. 1976 (Ph.D. Thesis).
- Montgomery, O.L.; Baumgardner, M.F. **The effects of the physical and chemical properties of soil on the spectral reflectance of soils**. Purdue University West Lafayette, IN. 1974. (LARS Information Note 112674).
- Moreira, M. A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agrônômicos**. Piracicaba. 1997. 142p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- Monteith, J.L. Solar radiation ; productivity in tropical ecosystems. **Journal Applied Ecology**, v.9, p.747-66, 1972.

- Myers, V. I. Soil, water, plant relationships. In: **Remote Sensing With Special Reference to Agriculture and Forestry**. Washington, DC: National Academy of Science, 1970. p.253-79.
- NASA **Landsat data User handbook**. Greenbelt, MD, 1976.
- Nicodemus, F.E.; Richmond, J.C.; Hsia, J.J.; Ginsberg, I.W.; Limperis, J. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. NBS monograph 160, 1970. 52p.
- Nobel, P.S. **Introduction to biophysical plant physiology**. W. H. Freeman and Company San Francisco, 1974.
- Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1989. 308p.
- Novo, E.M.L.M.; Hanson, J.D.; Curran, P.L. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v.107, n.7, p. 1283-1289. 1989
- Obukhov, A.I.; Orlov, D.S. Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations. **Soviet Soil Science**, v.2, p.174-184. 1964.
- Oliveira, J.B. de; Jacomine, P.K.T.; Camargo, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201 p.
- Pinter Jr., P.J.; Jackson, R.D.; Ezra, C.E.; Gausman, H.W. Sun-angle ; canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.12, p.1813-25, Dec. 1985.
- Price, J. C. Estimating vegetation amount from visible ; near infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v.41, n.1,p.29-34, Jul. 1992.
- Prince, S. D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, n.6, p.1313-30, Jun. 1991.
- Ponzoni, E.J. Aplicação do modelo SAIL no estudo da reflectância espectral de dosséis de mudas de *Eucalyptus sp* e de *Aspidosperma sp*. Curitiba. **Revista Floresta**, v.21,n. 1 e 2, p.45-70. 1994.
- Reichardt, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1993. 505p.
- Richardson, A. J.; Wieg, C.L.; Gausman, H.W.; Cuellar, J.A.; Gerbermann, A.H. Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.41, n.11,p.1401-7, Nov. 1975.
- Rickard, I.J.; Landers, M. HYDICE: An airborne system for imaging spectrometry. **Proceedings of SPIE**, n. 1937. 1993.
- Ripple, W.J. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.52, n.10, p.1669-75, Oct. 1985.
- Rocha, J.V. **The influence of ground survey size on accuracy of area estimates from satellite images**. Silsoe. 224p. Ph.D. Thesis- Cranfield Institute of Technology, 1992.
- Rosa, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Ed. EDUFU. 1990. 136 p.
- Rosenfield, G.H.; Fitzpatrick-Lins, K.; Ling, H.S. Sampling for thematic map accuracy testing. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.1, p.131-137, 1982.
- Seller, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis ; transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.8, p.1335-72, Aug. 1985.
- Slater, N. P. The interaction of electromagnetic radiation with the Earth's surface. In:Slater, N.P.,

- ed. **Remote Sensing Optics ; Optical System**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1980. cap. 9, p. 226-86.
- Sombroek, W.G. **Amazon Soils**. Wageningen, Center of Agricultural Publications and Documentation (PUDOC), 1966. 292p. (Agricultural Research Reports, 672).
- Souza, C.J.. **Uso de imagens-índices e de imagens proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de *Pinus ssp.*** São José dos Campos. 111p. (INPE-6398-TDI/614). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.
- Steffen, C.A.; Gama, F.F.; Novo, E.M.L.M. **Teste operacional de aquisição de dados aerotransportados –SADA, o experimento de Barra Bonita**. São José dos Campos:INPE, 1992. (INPE-5451-NCT/305).
- Steffen, C.A. Técnicas radiométricas com o SPECTRON SE-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. São José dos Campos:INPE, 1996. v.1, p. 9-14.
- Szeicz, G. Solar radiation for plant growth. **The Journal of Applied Ecology**, v.2, n.2, p. 617-36, 1974.
- Taiz, L. ; Zeiger, E. **Plant physiology**. California: The Benjamin/Cummings Pub. Co., 1991. 559p.
- Travaglia, C. Principles of satellite imagery interpretation. In: **Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO)**. Roma: FAO, 1990. p. 85-97. (RSC Series 54).
- Tomlin, D.** Geographic information systems and cartographic modeling. **New York: Prentice Hall, 1990.**
- Tubelis, A.; Nascimento, F. J. L. do. **Meteorologia descritiva: Fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel. 1980. 374p.
- Tucker, C.J. ; Garratt, M.W. Leaf optical system modeled as a stochastic process. **Applied Optics**, v.16, n.3, p.635-42, 1977.
- . Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetations. **Remote Sensing of Environment**, v.8, n.2,p.127-50, 1979.
- Vanderbilt, V.C.;Grant, L. Light polarization measurements: a method to determine the specular ; difuse light scattering properties of both leaves ; plant canopies. In: II Coll. International Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection. **Proceedings**. Bordeaux, 12-16, Sept., 1983.
- Vane, G.; Goetz, A.F.H. Terrestrial imaging spectrometry. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p. 1-29. 1988.
- Vane, G.; Duval, J.E.; Wellman, J.B. Imaging spectroscopy of the Earth and other solar system bodies. In: Pieter, C.M.; Englert, P.A.J. eds. **Remote Geochemical analysis: Elemental and Mineralogical Composition**. Cambridge University Press, Cambridge, 1993. p.121-144.
- Velasco, F. R. D.; Prado, L. O. C.; Souza, R. C. M.** Sistema MAXVER: **Manual do usuário**. São José dos Campos:INPE, 1978, 72p. (INPE-1315-NTI/110).
- Vygodskaya, N. N.; Gorshkova, I.; Fadeyeva, Ye. V. Theoretical estimates of sensitivity in some vegetation indices to variation in the canopy condition. **International Journal of Remote Sensing**, v.10, n.12, p.1857-72, 1989.
- Ziller, Z.M. Ensaio sobre epistemologia pedológica . **Série Pedológica**, v. XIX, n.1, p.5-28. 1982.
- Wiegand, C.L.; Gausman, H.W.; Cuellar, J.A.; Gerberman, A.H.; Richardson, A.J. Vegetation density as deduced from ERTS-1 MSS response. In: ERTS Symposium, 3., **Proceedings**. Wash

ington, DC, v.1, 1974, p. 93-116.

Wiengand, G. L.; Richardson, A. J.; Escobar, D. E. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.2, p.105-119, 1991.

Witte, W.G.; Whitlock, C.H.; Harriss, R.C.; Usry, J.W.; Poole, L.R.; Houghton, W.M.; Morris, W.D.; Gurganus, E.A. Influence of dissolved organic materials on turbid water optical properties and remote sensing reflectance. **Journal of Geophysical Research**, v.87, n.C1, p.441-446, 1982.