

## **General Disclaimer**

### **One or more of the Following Statements may affect this Document**

- This document has been reproduced from the best copy furnished by the organizational source. It is being released in the interest of making available as much information as possible.
- This document may contain data, which exceeds the sheet parameters. It was furnished in this condition by the organizational source and is the best copy available.
- This document may contain tone-on-tone or color graphs, charts and/or pictures, which have been reproduced in black and white.
- This document is paginated as submitted by the original source.
- Portions of this document are not fully legible due to the historical nature of some of the material. However, it is the best reproduction available from the original submission.

E82-10173

OR-168596



SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA  
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

"Made available under NASA sponsorship  
in the interest of early and wide dis-  
semination of Earth Resources Survey  
Program information and without liability  
for any use made thereof."

(E82-10173) REMOTE SENSING: PHYSICAL  
PRINCIPLES, SENSORS AND PRODUCTS, AND THE  
LANDSAT (Instituto de Pesquisas Espaciais,  
Sao Jose) 79 p HC A05/MF A01 CSCL 14E

N82-22608

Unclas  
G3/43 00173

RECEIVED BY  
NASA SRI FACILITY  
DATE: 2-18-82  
REF. NO. 002949

X  
SRI



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

1. Publicação nº <i>INPE-2226-MD/013</i>	2. Versão	3. Data <i>Set., 1981</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DSR</i>	Programa <i>DAQ</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>PRINCÍPIOS FÍSICOS</i> <i>SENSORES</i> <i>LANDSAT</i>			
7. C.D.U.: <i>528.711.7</i>			
8. Título  <i>SENSORIAMENTO REMOTO: PRINCÍPIOS FÍSICOS; SENSORES E PRODUTOS, E SISTEMA LANDSAT</i>		10. Páginas: <i>81</i>	
		11. Última página: <i>72</i>	
		12. Revisada por <i>Keiko Tanaka</i>  <i>Keiko Tanaka</i>	
9. Autoria <i>Carlos Alberto Steffen</i> <i>João Antonio Lorenzetti</i> <i>José Luiz Stech</i> <i>Ricardo Cartaxo Modesto de Souza</i>		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>	
Assinatura responsável <i>[assinatura]</i>			
14. Resumo/Notas  <i>Este trabalho, desenvolvido com objetivos didáticos constitui uma introdução às técnicas de aquisição de dados por sensores remotos. Discute-se as propriedades dos elementos envolvidos na fase de aquisição e alguns tipos de sensores e respectivos produtos, de uso mais frequente. Com maior ênfase é analisado o sistema LANDSAT e as características das imagens MSS e RBV.</i>			
15. Observações			

ABSTRACT

*This work was developed for teaching purposes and constitutes an introduction to the techniques of data acquisition by remote sensing. A discussion is presented on the properties of the elements involved in the acquisition phase and also some types of sensors more frequently used with their respective products.*

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vii
<u>CAPÍTULO 1 - PRINCÍPIOS FÍSICOS DE SENSORIAMENTO REMOTO</u> .....	1
1.1 - Sensoriamento remoto - conceito .....	1
1.2 - Elementos da fase de aquisição .....	2
1.2.1 - Energia radiante .....	4
1.2.2 - Fontes .....	13
1.2.3 - Efeitos atmosféricos .....	18
1.2.4 - Superfícies .....	21
1.2.5 - Sensores .....	27
<u>CAPÍTULO 2 - SENSORES E PRODUTOS</u> .....	29
2.1 - Radiômetros .....	29
2.2 - Sensores fotográficos .....	32
2.3 - Radiômetro imageador (SCANNER) .....	42
2.4 - Radar .....	44
<u>CAPÍTULO 3 - SISTEMA LANDSAT</u> .....	49
3.1 - Características do satélite .....	49
3.2 - Características orbitais .....	52
3.3 - Sistema imageador multiespectral - MSS ("MULTISPECTRAL SCANNER SYSTEM") .....	55
3.3.1 - Formação do "pixel" ("Picture Element") .....	56
3.3.2 - Formação da imagem .....	58
3.4 - Sistema de Televisão RBV ("RETURN BEAM VIDICON") .....	60
3.5 - Características das imagens MSS-LANDSAT .....	63
3.6 - Recepção e processamento das imagens LANDSAT .....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Elementos da fase de aquisição .....	3
1.2 - Espectro Eletromagnético .....	6
1.3 - Intensidade radiante e ângulo sólido .....	10
1.4 - Radiância de uma superfície .....	11
1.5 - Reflexão, transmissão e absorção de um fluxo de REM .....	12
1.6 - Reflectância espectral de amostras de solo, de água e de vegetação .....	13
1.7 - Radiância espectral de um corpo negro em várias temperaturas .....	16
1.8 - Espectro solar .....	18
1.9 - Reflexão: especular e difusa .....	22
2.1 - Componentes básicos de um radiômetro .....	29
2.2 - Elementos formadores da resolução de um sistema sensor ...	31
2.3 - Partes de uma câmara fotográfica aérea .....	33
2.4 - Curva característica de um filme P&B .....	35
2.5 - Sensitividade espectral .....	36
2.6 - Filme colorido negativo .....	38
2.7 - Filme colorido reversível .....	39
2.8 - Filme infravermelho falsa-cor .....	40
2.9 - Radiômetro imageador .....	43
2.10 - Radar de Visada Lateral .....	45
3.1 - Configuração do Sistema LANDSAT, utilizada pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE .....	50
3.2 - Configuração do satélite LANDSAT .....	51
3.3 - Órbita do satélite LANDSAT .....	52
3.4 - Órbita heliossíncrona do satélite LANDSAT .....	53
3.5 - Órbitas do LANDSAT par um dia de recobrimento .....	54
3.6 - Sistema imageador MSS-LANDSAT .....	55
3.7 - Geometria da matriz de terminais de fibras ópticas do MSS-LANDSAT 1 e 2 .....	57
3.8 - Relação entre as áreas "PIXEL" e ERT .....	57
3.9 - Configuração do sistema RBV - LANDSAT 1 e 2 .....	60
3.10 - Configuração do sistema RBV - LANDSAT 3 .....	62
3.11 - Reflectância espectral de alvos naturais e canais MSS-LANDSAT .....	63

	<u>Pág.</u>
3.12 - Altura solar em diferentes épocas do ano e latitudes .....	65
3.13 - Influência atmosférica na aquisição dos dados MSS-LANDSAT.	66
3.14 - Formato de anotação das imagens fotográficas MSS e RBV ...	70

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Principais janelas atmosféricas .....	19
2.1 - Tipos de filmes e suas características .....	41
3.1 - Recobrimento lateral das imagens MSS LANDSAT .....	58

## CAPÍTULO 1

### PRINCÍPIOS FÍSICOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

#### 1.1 - SENSORIAMENTO REMOTO - CONCEITO

Um fluxo de radiação eletromagnética ao se propagar pelo espaço pode interagir com superfícies ou objetos, sendo por estes refletido, absorvido e mesmo reemitido. As variações que essas interações produzem no fluxo considerado dependem fortemente das propriedades físico-químicas dos elementos irradiados e o fluxo resultante constitui uma valiosa fonte de informações a respeito daquelas superfícies ou objetos. Essa idéia tem motivado a criação de equipamentos, que, situados a grandes distâncias de alvos naturais, podem detectar e registrar o fluxo de radiação Eletromagnética (REM) proveniente destes; as informações obtidas, geralmente sob a forma de gráficos ou imagens, são então analisadas por especialistas na busca de dados que os auxiliem no desenvolvimento de projetos de pesquisa e controle de recursos naturais.

A utilização de sistemas sensores em nível aéreo ou orbital permite a aquisição de imagens da superfície da Terra, de forma sintética e mesmo repetitiva. Considerando-se que as propriedades dos alvos naturais se manifestam de forma característica no fluxo de REM que refletem ou emitem, tais imagens, quando obtidas em faixas espectrais adequadas, permitem que um máximo de discriminação entre os alvos e sua vizinhança seja conseguido e constituem um meio rápido, econômico e eficiente para a detecção daqueles na área analisada.

Dentro desse contexto pode-se conceituar Sensoriamento Remoto como um conjunto de atividades, cujo objetivo reside na caracterização das propriedades de alvos naturais, através da detecção, registro e análise do fluxo de energia radiante, por eles refletido ou emitido.

## 1.2 - ELEMENTOS DA FASE DE AQUISIÇÃO

Na metodologia de Sensoriamento Remoto, duas fases podem ser destacadas: a fase de AQUISIÇÃO, relacionada com os processos de detecção e registro da informação, e a fase de ANÁLISE, que compreende o tratamento e a interpretação dos dados obtidos.

Especificamente na fase de aquisição, pode-se identificar a participação de elementos cuja influência nas características da informação obtida deve ser bem compreendida para uma correta interpretação; basicamente esses elementos são:

- Energia Radiante
- Fonte
- Alvo
- Trajetória
- Sensor

Como pode ser observado no exemplo da Figura 1.1, a energia radiante emitida pela fonte (sol), após atravessar a atmosfera (trajetória), irradia a superfície (alvo), sendo por ela refletida; parte dessa energia atravessa novamente a atmosfera e é coletada pelo sistema sensor, onde é detectada e registrada.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

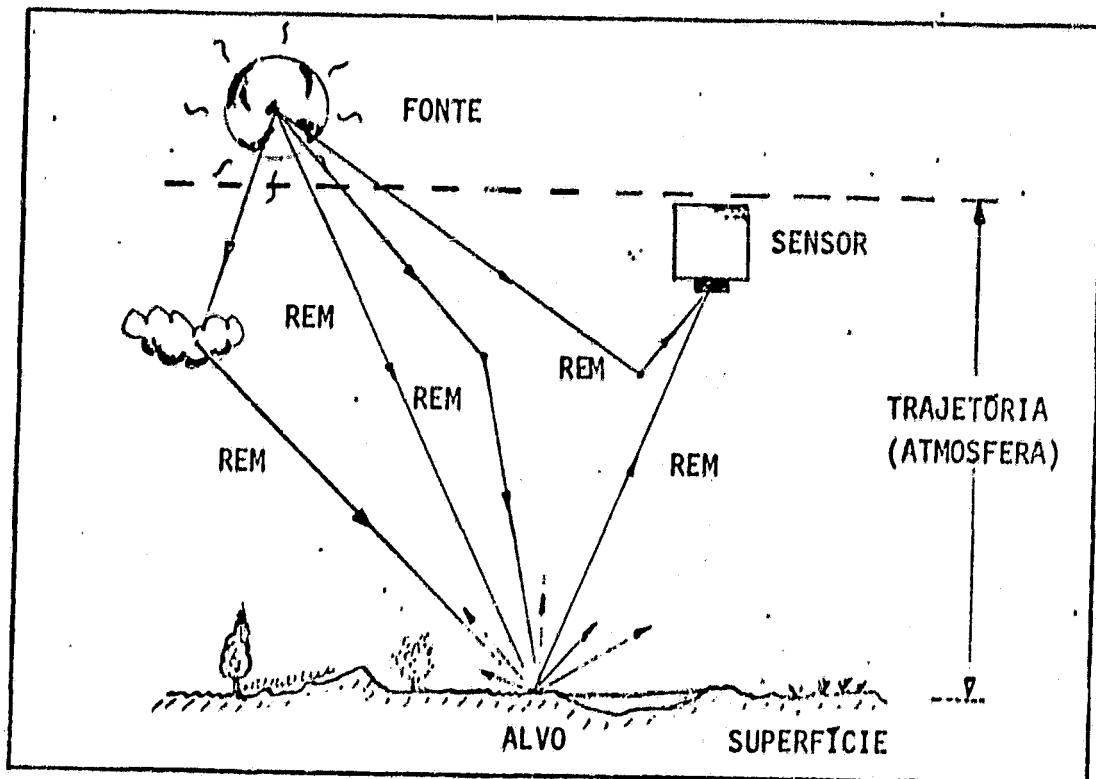


Fig. 1.1 - Elementos da Fase de Aquisição.

### 1.2.1 - ENERGIA RADIANTE

Sempre que se realiza um trabalho, algum tipo de energia deve ser transferida de um corpo a outro ou de um local a outro no espaço. De todas as possíveis formas de energia, uma de especial importância ao sensoriam<sup>to</sup> remoto e a única que não necessita de um meio material para se propagar é a energia radiante ou energia eletromagnética. O exemplo de energia radiante mais familiar e de maior importância é a energia solar, que se propaga pelo espaço vazio desde o sol até a terra.

Dois são os modelos usados para explicar a natureza da energia eletromagnética. Enquanto esta se propaga de um ponto a outro, é conveniente utilizar o assim chamado modelo ondulatório. Segundo este modelo, a energia se propaga através do espaço com a velocidade de 300.000 km/seg, sob a forma de ondas. Uma onda eletromagnética consiste em dois campos, um elétrico e outro magnético, oscilantes na direção perpendicular à direção de propagação e mutuamente perpendiculares entre si. Assim, a radiação eletromagnética pode-se atribuir um comprimento de onda  $\lambda$  e uma frequência  $f$ , que estão relacionados entre si e a com a velocidade de propagação  $c$ , pela equação:

$$\lambda f = c \quad (1.1)$$

com:  $\lambda$  em unidades de comprimento, p.ex., metros;

$f$  em unidades de tempo<sup>-1</sup>, p.ex., ciclos/seg. ou Hertz (Hz);

$c$  em unidades de velocidade, p.ex., m/seg;

$c = 3 \times 10^8$  m/seg.

Sempre que a radiação eletromagnética passa de um meio material para outro de diferente densidade (índice de refração), tem-se uma mudança na velocidade de propagação  $c$  e no comprimento de onda, sendo conservada a frequência.

Embora a teoria ondulatória seja bastante adequada para longos comprimentos de onda e para exprimir os processos de propagação da energia eletromagnética, quando se trata dos processos de absorção e emissão de energia radiante e curtos comprimentos de onda, costuma-se usar a teoria corpuscular da radiação eletromagnética. Este modelo, proposto em 1900 por Max Planck, afirma que a energia é emitida, absorvida ou propagada não de maneira contínua, mas sim em pequenas parcelas discretas de energia chamadas quanta (plural de quantum) ou fótons.

Um fluxo de radiação eletromagnética de frequência  $f$  é constituído de fótons com a energia  $E$ , dada pela equação:

$$E = hf \quad (1.2)$$

onde  $h = 6,624 \times 10^{-34}$  joule.seg. é chamada constante de Planck. Usando-se a equação 1.1, também pode-se escrever:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3)$$

Vê-se, então, que a quantidade de energia contida em cada fóton de um fluxo de radiação eletromagnética é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao comprimento de onda a ele associado.

#### a) O Espectro Eletromagnético

A faixa de comprimento de onda ou frequências em que se pode encontrar a REM é praticamente ilimitada. Com a tecnologia atualmente disponível, pode-se gerar ou detectar a REM numa extensa faixa de frequência, que se estende de 1 a  $10^{24}$  Hz, ou comprimento de onda aproximadamente de  $10^8$  a  $10^{-15}$  metros. Pode-se esquematizar a distribuição da REM segundo seu comprimento de onda ou frequência, ao que se chama de espectro eletromagnético, como se vê na Figura 1.2.

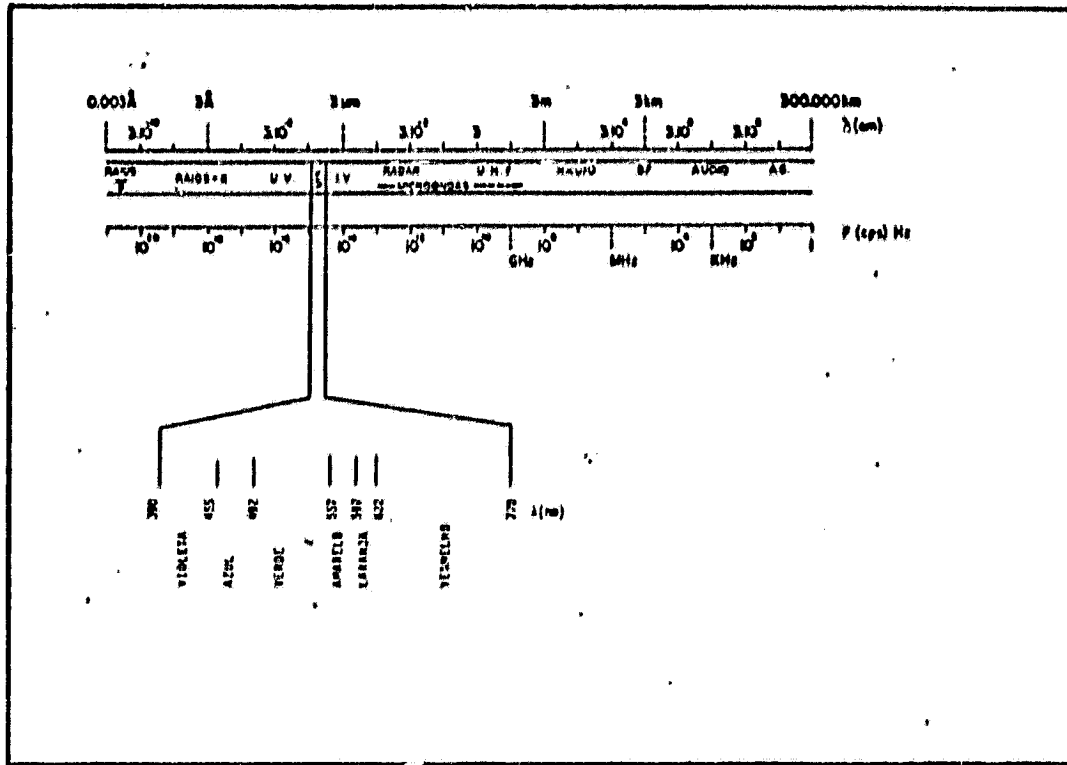


Fig. 1.2 - Espectro Eletromagnético.

Este espectro é subdividido em faixas, que representam regiões possuindo características peculiares em termos dos processos físicos geradores de energia em cada faixa, ou dos mecanismos físicos de detecção desta energia. Embora os limites de cada faixa espectral não sejam bem definidos, as seguintes regiões podem ser destacadas:

*Ondas de Rádio* Estas ondas eletromagnéticas têm frequências relativamente baixas e conseqüentemente grandes comprimentos de onda, que vão de aproximadamente alguns centímetros a algumas centenas de metros. As ondas eletromagnéticas nesta faixa são utilizadas para comunicação a longa distância, pois, além de serem pouco atenuadas pela atmosfera, são refletidas pela ionosfera, propiciando uma propagação de longo alcance.

*Microondas* - As microondas podem ser definidas como aquelas que se situam na faixa de 1 mm a 30 cm, correspondendo à frequência entre  $3 \times 10^{11}$  e  $10^9$  Hz. Nesta faixa de comprimentos de onda, podem-se construir dispositivos capazes de produzir feixes de REM altamente concentrados, chamados radares, que podem ser usados como meio de sondagem de maneira semelhante ao uso de um sonar na água. A radiação eletromagnética nesta faixa tem sido amplamente utilizada em sensoriamento remoto, pois a sua pouca atenuação pela atmosfera ou pelas nuvens, propicia um excelente meio de uso de sensores de microondas em qualquer condição de tempo.

*Infravermelho* - Este tipo de radiação, de grande importância para o sensoriamento remoto, engloba radiação com comprimentos de onda de 0,75  $\mu$ m a 1,0 mm. Uma das características da radiação infravermelha é sua fácil absorção pela maioria das substâncias, nelas produzindo um efeito de aquecimento. Deve-se notar que a energia emitida pelos corpos aquecidos se situa principalmente nesta faixa.

*Visível* - A radiação visível pode ser definida como aquela capaz de produzir a sensação de visão para o olho humano normal. Esta radiação, que vai desde o violeta até o vermelho, tem somente uma pequena variação de comprimento de onda, que vai de 380 a aproximadamente 750 nm. Este tipo de radiação pode ser produzido, p.e., por luminescência ou por corpos muito quentes. Esta faixa de comprimentos de onda é de grande importância para o sensoriamento remoto, pois imagens nelas obtidas, geralmente apresentam excelente correlação com a experiência visual do intérprete.

*Ultravioleta* - A radiação ultravioleta engloba uma extensa faixa do espectro eletromagnético, que vai de 100 Å a 4000 Å ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ). É interessante notar que as películas fotográficas são mais sensíveis à radiação ultravioleta que à luz visível. Embora esta faixa do espectro mostre um relativo potencial de aplicações em sensoriamento remoto, tais como detecção de minerais por luminescência, po

luição de minerais por luminescência, poluição marinha, a forte atenuação atmosférica nesta faixa se apresenta como um grande obstáculo para a sua utilização.

*Raios-X* - Os raios-X são definidos como radiação na faixa de comprimento de onda de, aproximadamente,  $10^{-8}$  a  $10^{-12}$  m. São gerados principalmente, pela parada ou freamento de elétrons de alta energia. Por se constituírem de fótons de alta energia, os raios-X, são altamente penetrantes, sendo uma poderosa ferramenta em pesquisa sobre a estrutura da matéria.

*Raios-gama* - Os raios-gama são as mais penetrantes das emissões de substâncias radiativas. Não existe, em princípio, limite superior para a frequência das radiações gama, embora ainda seja encontrada uma faixa superior de frequência para a radiação conhecida como raios cósmicos.

A faixa espectral, que se estende de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $15,0 \mu\text{m}$ , é a mais usada em sensoriamento remoto. Esta região do espectro é conhecida por espectro óptico, pois nela os componentes ópticos de reflexão e refração, tais como lentes, espelhos, prismas, etc., podem ser usados para coletar e reorientar a radiação.

#### b) Grandezas Radiométricas

As propriedades radiantes de uma superfície ou objeto costumam ser estudadas através da medição e comparação, em intervalos de comprimento de onda discretos, dos fluxos de REM envolvidos na interação. Ao conjunto das técnicas utilizadas na medição dessas grandezas, no espectro óptico, denomina-se Radiometria. As principais grandezas radiométricas são:

*Energia Radiante* -  $Q$  - como qualquer outra modalidade de energia é medida em joules (J)

*Fluxo Radiante* -  $\phi$  - é definido como a quantidade de energia radiante, por unidade de tempo, que flui por uma posição no espaço.

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{em J/g ou Watt (W)} \quad (1.4)$$

*Irradiância* -  $E$  - é a densidade superficial do fluxo que irradia uma superfície:

$$E = \frac{\Delta \phi}{\Delta A} \quad \text{em W/m}^2 \quad (1.5)$$

*Exitância* -  $M$  - é a densidade superficial do fluxo refletido ou emitido por uma superfície:

$$M = \frac{\Delta \phi}{\Delta A} \quad \text{em W/m}^2 \quad (1.6)$$

Note-se que a diferença entre a irradiância e a exitância reside no sentido de propagação do fluxo radiante.

*Intensidade Radiante* -  $I$  - uma fonte pontual radia energia para todo o espaço. Uma pequena superfície ( $\Delta A$ ), situada a uma certa distância ( $r$ ) da fonte, define com esta uma direção e um ângulo sólido (cônico)  $\Delta \omega$  como mostra a Figura 1.3. Chama-se intensidade radiante da fonte, na direção considerada, a razão entre o fluxo que se propaga no ângulo sólido e o valor deste; assim:

$$I = \frac{\Delta \phi}{\Delta \omega} \quad \text{em W/sterradianos(sr)} \quad (1.7)$$

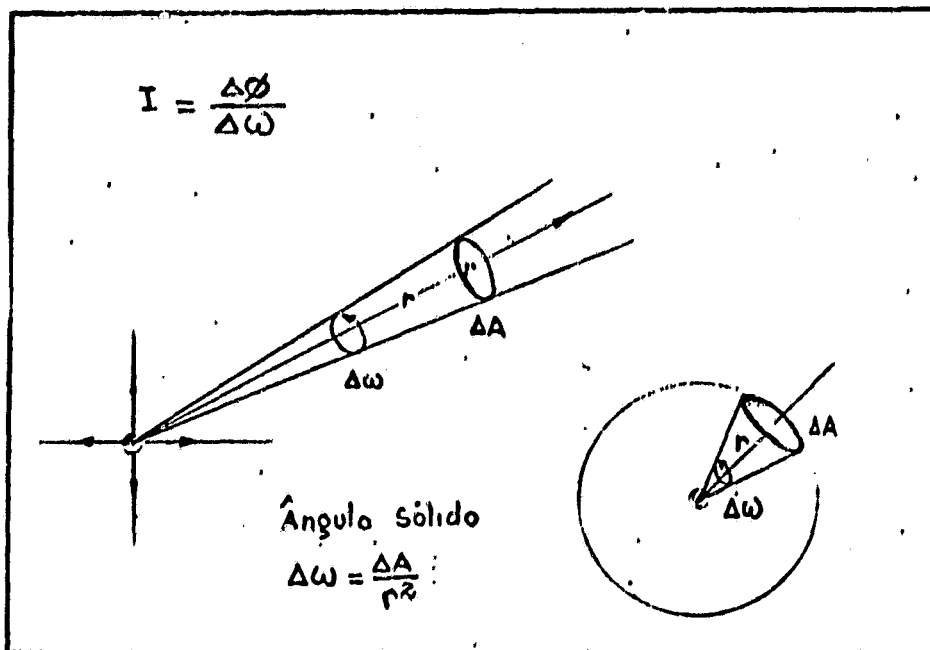


Fig. 1.3 - Intensidade radiante e ângulo sólido.

Uma fonte pontual, cuja intensidade numa direção  $\theta$ , é dada por:

$$I_{\theta} = I_0 \cos\theta \quad (1.8)$$

onde  $I_0$  é sua intensidade radiante máxima e  $\theta$ , o ângulo entre as direções de  $I_0$  e  $I_{\theta}$ , é denominada FONTE LAMBERTIANA.

*Radiância - N* - ou intensidade radiante média dos pontos que constituem uma amostra de superfície refletora ou emissora, pode ser avaliada pela razão entre a intensidade radiante da amostra (como se esta fosse pontual) e a sua área, projetada na direção da medição (Figura 1.4).

$$N = \frac{I}{\Delta A \cos\theta} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A \cos\theta \Delta\omega} \quad \text{em } \frac{W}{m^2 sr} \quad (1.9)$$

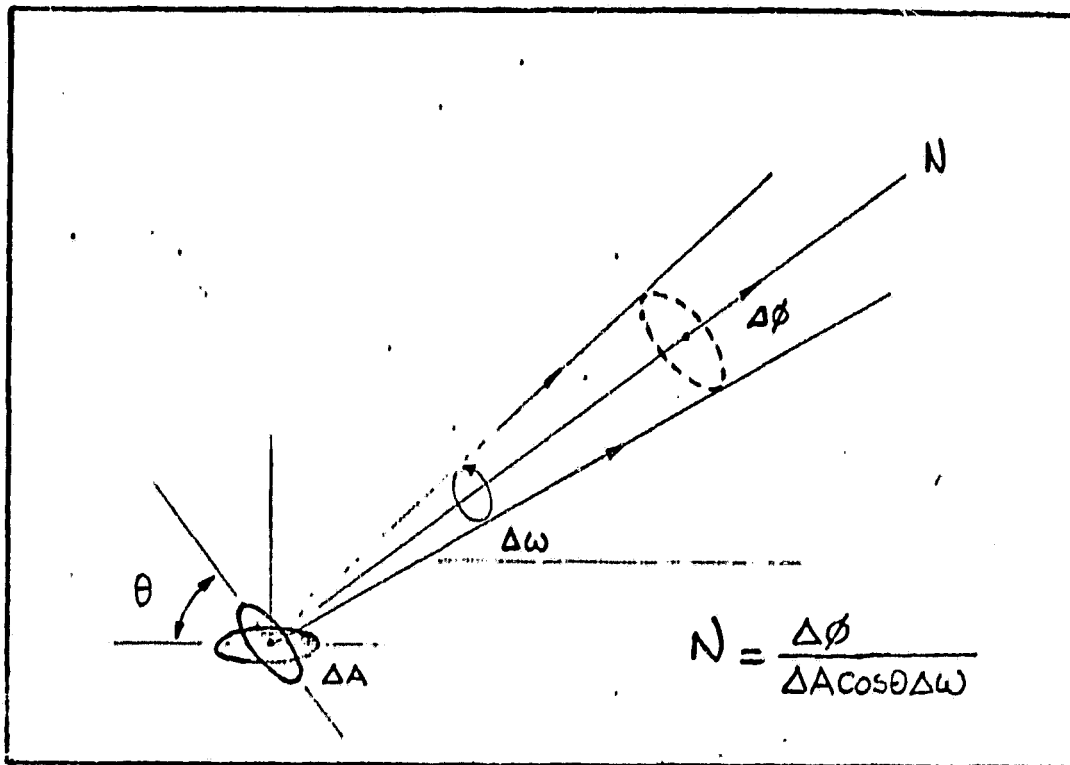


Fig. 1.4 - Radiância de uma superfície

É interessante notar que se a amostra é constituída de pontos que se comportam como fontes lambertianas:

$$N_{\theta} = \frac{I_{\theta}}{\Delta A \cos\theta} = \frac{I_0 \cos\theta}{\Delta A \cos\theta} = N_0$$

ou seja, a radiância da amostra não varia com a direção. Neste caso a superfície em questão é denominada LAMBERTIANA.

*Reflectância, Absortância e Transmitância* - Quando um fluxo de REM irradia um objeto, três fenômenos podem ocorrer: parte do fluxo é refletido; parte penetra no objeto, sendo progressivamente absorvido; e parte consegue atravessá-lo, emergindo novamente para o espaço como mostra a Figura 1.5. Considerando-se a lei de conservação da energia, pode-se escrever:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \tag{1.10}$$

onde  $i$ ,  $r$ ,  $a$  e  $t$ , indicam as naturezas dos fluxos envolvidos, isto é: incidente, refletido, absorvido e transmitido, respectivamente. Dividindo-se os dois membros da equação anterior por  $\phi_i$ , tem-se:

$$1 = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (1.11)$$

Nesta equação, as frações do segundo membro costumam ser denominadas reflectância, absortância e transmitância do objeto, e representadas pelas letras gregas  $\rho$ ,  $\alpha$  e  $\tau$ , então:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1.12)$$

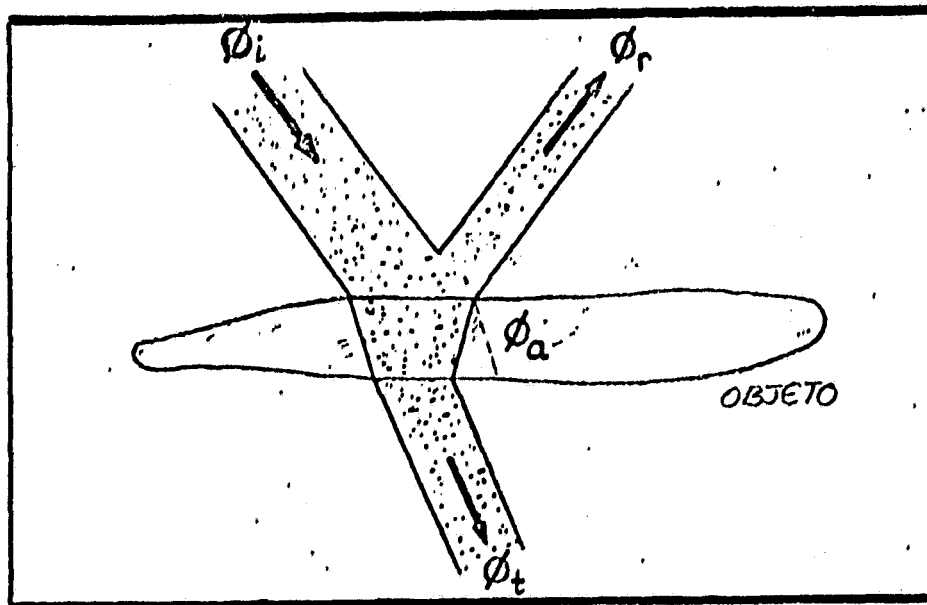


Fig. 1.5 - Reflexão, transmissão e absorção de um fluxo de REM.

### c) Grandezas Espectrais

Todas as grandezas radiométricas, anteriormente definidas podem ser avaliadas em pequenos intervalos de comprimento de onda sucessivos, para a caracterização espectral do fluxo considerado; por exemplo, se a radiância de uma superfície é medida num pequeno interval

lo de comprimento de onda  $\Delta\lambda$ , o resultado obtido, denominado radiância espectral  $\bar{e}$  é expresso por:

$$N_{\lambda} = \frac{\Delta\phi}{\Delta A \cos\theta \Delta\omega \Delta\lambda} \quad \text{em } W/m^2 \text{ nm}$$

Usualmente as grandezas radiométricas espectrais são apresentadas sob a forma de gráficos, onde aparecem registrados em função do comprimento de onda. Como exemplo, a Figura 1.6 mostra através dos gráficos de reflectância o comportamento espectral de amostras de água, de solo e de vegetação.

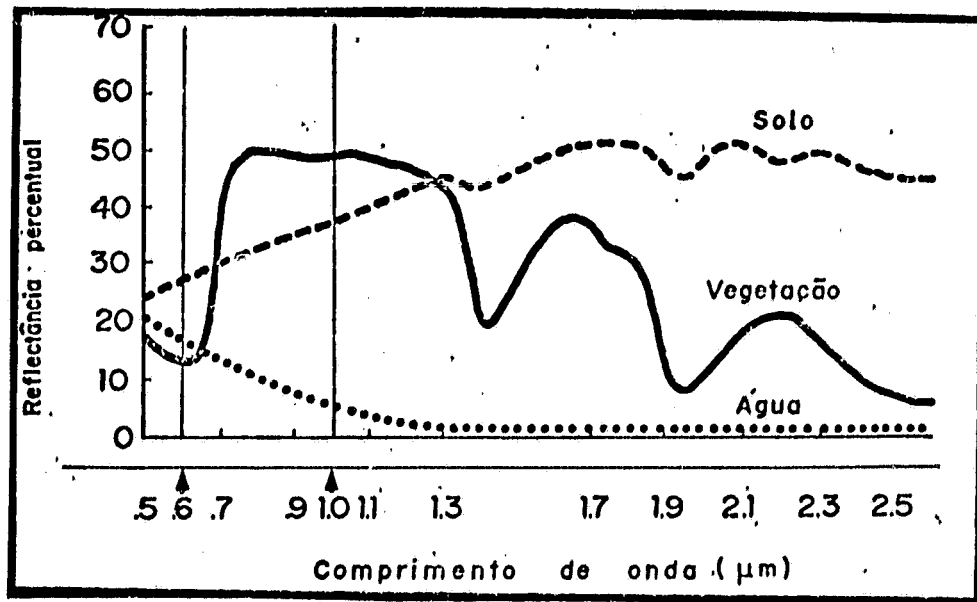


Fig. 1.6 - Reflectância espectral de amostras de solo, de água e de vegetação.

### 1.2.2 - FONTES

Dentro da faixa do espectro ótico (0,3 a 15 μm), onde a maioria dos experimentos em sensoriamento remoto é realizada, pode-se trabalhar com a energia emitida ou refletida pelos alvos naturais.

Essa energia refletida ou emitida pode-se originar de fontes naturais como: o Sol, a Terra, a radiatividade, etc. ou fontes artificiais como: o Radar e o Laser.

Uma fonte de energia eletromagnética é caracterizada por um espectro de emissão, que pode ser contínuo ou distribuído em faixas discretas. O sol, por exemplo, emite radiação distribuída, continuamente, numa faixa que vai da região dos raios-X até a região das microondas. Os radares e os lasers emitem radiação concentrada em estreitas faixas do espectro.

#### a) Radiação Térmica

Todo corpo com temperatura superior a zero grau absoluto ( $0^{\circ}$  K) emite radiação eletromagnética. A quantidade de radiação emitida em  $\text{Watt/m}^2$  (exitância) é função da temperatura do corpo, e é por isso denominada térmica. Assim, se através de algum sensor remoto houver possibilidade de avaliar a energia emitida pelo corpo, poder-se-á estimar sua temperatura.

Como cada corpo possui características próprias de emissão térmica, para poder analisar o espectro da radiação emitida por diferentes corpos, segundo um mesmo enfoque, deve-se lançar mão de uma teoria geral de emissão, que serve como bases de análise, cuja teoria dá-se o nome de Teoria do Radiador Perfeito.

Define-se radiador perfeito como um corpo capaz de absorver toda energia radiante, sobre ele incidente. Um objeto com esta propriedade costuma também ser chamado de Corpo Negro (C.N.). Um corpo negro é capaz de emitir mais fluxo radiante, total ou espectral, por unidade de área que qualquer outro, não-negro, na mesma temperatura.

O Corpo negro é uma abstração útil para o desenvolvimento de modelos que explicam a emissão térmica.

Planck, trabalhando sobre este modelo e supondo que a energia é emitida discretamente em uma unidade chamada quanta, deduziu que a exitância espectral de um corpo negro pode ser relacionada à sua temperatura absoluta, pela seguinte relação (lei de Planck).

$$M_{\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (1.13)$$

onde:

$$c_1 = 3,74 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$c_2 = 1,44 \times 10^{-2} \text{ m}^{\circ}\text{K}$$

T = temperatura absoluta

Na Figura 1.7, apresenta-se a exitância espectral de um corpo negro para várias temperaturas. Verifica-se que o comprimento de onda, correspondente a exitância espectral máxima, desloca-se na direção de comprimentos de onda cada vez menores, à medida que aumenta a temperatura do C.N. A relação entre o comprimento de onda de máxima exitância espectral e a temperatura absoluta do corpo é dada por (lei de Wien):

$$\lambda_m = c/T \quad (1.14)$$

onde:

$$c = 2898 \text{ } \mu\text{m}^{\circ}\text{K}$$

T = temperatura absoluta

A exitância radiante de um corpo negro em todo o espectro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta, ou seja:

$$M = \sigma T^4 \quad (1.15)$$

onde:

$T$  = temperatura absoluta

$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$  = constante de Stefan-Boltzmann.

Esta relação é conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann. Assim, por exemplo, ao duplicar-se a temperatura de um corpo, sua exitância será multiplicada por 16.

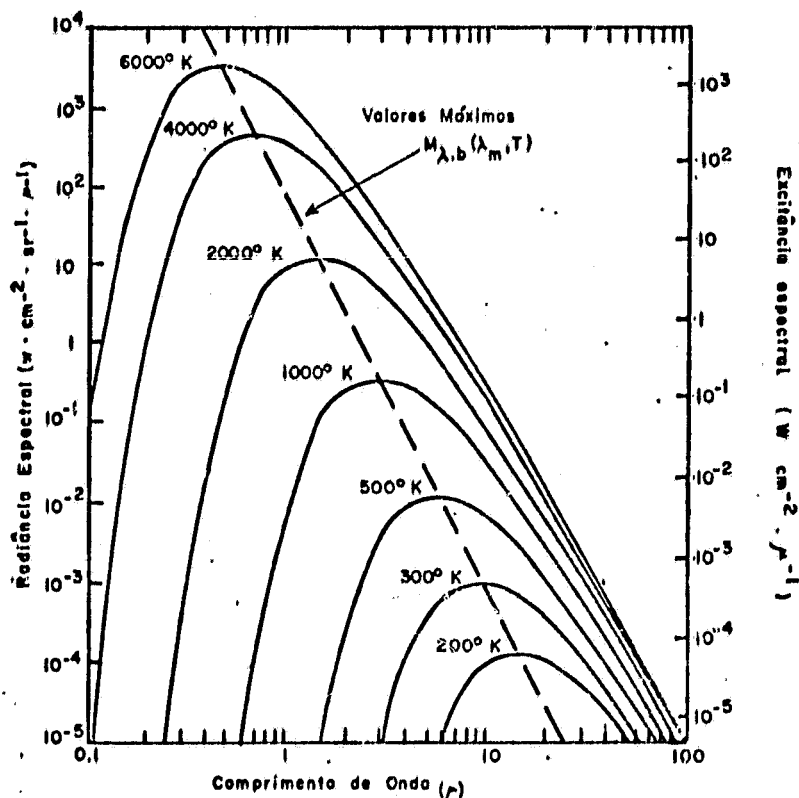


Fig. 1.7 - Radiação espectral de um corpo negro em várias temperaturas.

#### b) Corpos Reais

Na natureza, os diferentes materiais não são corpos ne gros, por isso, não seguem, perfeitamente as leis de radiação defini das anteriormente. Uma das principais razões para isto está no fato de

que parte da radiação incidente não é absorvida, sendo refletida ou mesmo transmitida.

Quando se trata de corpos reais, deve-se introduzir, na lei de radiação de Planck, uma constante multiplicadora, conhecida como emissividade ( $\epsilon$ ).

A emissividade ( $\epsilon$ ) é definida com a razão de exitância de um corpo real pela exitância de um corpo negro, à mesma temperatura. Como a exitância de um corpo negro é a maior possível para temperatura considerada, a emissividade do corpo real é sempre menor que 1. Desta forma, a emissividade de um corpo caracteriza quando este corpo se aproxima ou se afasta do padrão teórico de um corpo negro.

Este parâmetro é muito importante para a determinação da temperatura de um corpo, através de medidas remotas de sua exitância, pois a diferença entre a temperatura real do corpo e aquela obtida remotamente será tanto maior, quanto menor for o valor da sua emissividade.

### c) Radiação Solar

O sol é a fonte de energia eletromagnética mais importante, utilizada em sensoriamento remoto. Ele emite radiação como um corpo negro, a uma temperatura aproximada de 6000 °K, na faixa espectral de 0,2 a 10  $\mu\text{m}$ , como pode ser visto nas curvas a e b da Figura 1.8.

O fluxo de energia solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é de cerca de 2,0  $\text{cal cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  1400 Watts/m<sup>2</sup>. Este valor é chamado constante solar.

Pela Figura 1.8, verifica-se que o comprimento de onda de máxima emissão é, aproximadamente, 0,5  $\mu\text{m}$  e que quase 99% da radiação solar cai dentro do "range" espectral de 0,15 a 4,0  $\mu\text{m}$ .

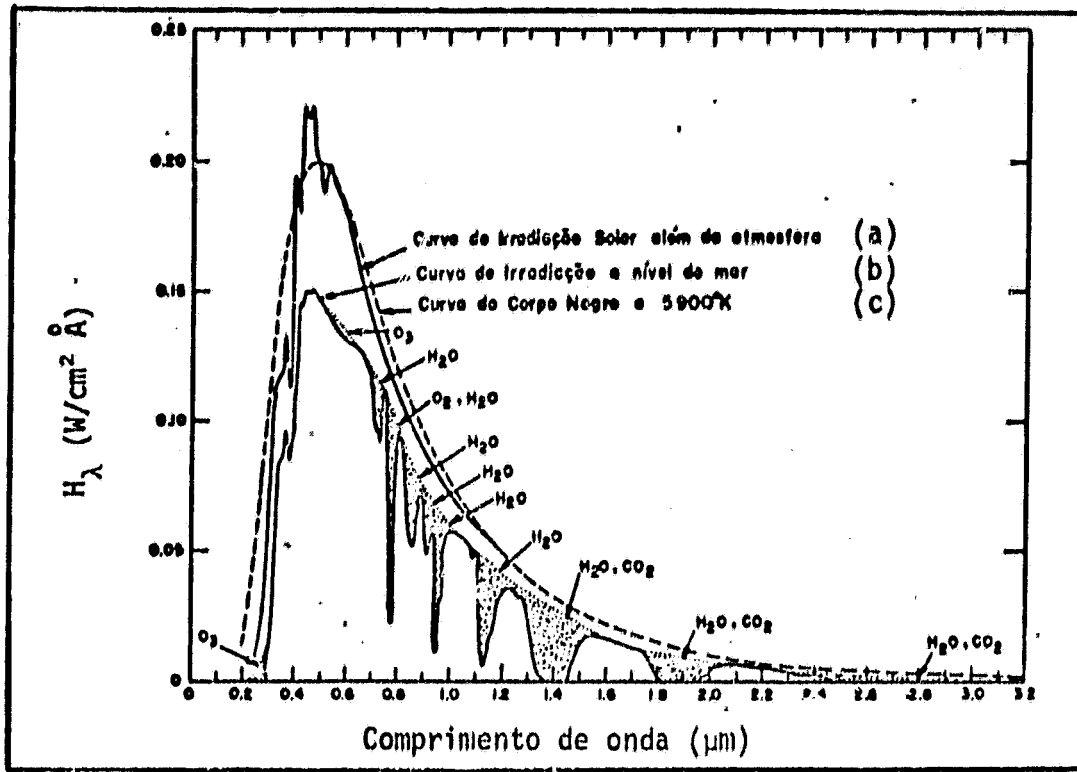


Fig. 1.8 - Espectro solar

### 1.2.3 - EFEITOS ATMOSFÉRICOS

Quando se adquire um dado através de um sensor remoto, seja a nível de satélite ou de aeronave, o sinal coletado, na maioria das vezes, é a radiação proveniente do sol, que interage com a atmosfera até atingir o alvo e retorna ao sensor, interagindo novamente com a atmosfera. Mesmo que o sinal medido seja a radiação emitida pelo alvo, ela interage com a atmosfera até atingir o sensor (Figura 1.1). Assim, é importante conhecer os efeitos causados pela atmosfera no sinal medido por um sensor remoto.

Dois são os processos de atenuação mais importantes que afetam a propagação da REM pela atmosfera: absorção e espalhamento.

#### a) Absorção

A REM ao se propagar pela atmosfera é absorvida seletivamente pelos seus vários constituintes, tais como vapor d'água, ozônio,

monóxido de carbono, etc. Dentro da faixa do visível (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ), o ozônio é o principal atenuador por absorção, embora em muitos casos práticos esta absorção possa ser desprezada, por ser muito pequena.

Nas curvas a e c da Figura 1.8, são mostrados os espectros de radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar. Nesta figura também estão indicadas as faixas onde ocorrem absorção pelos diversos constituintes.

Existem ao longo de todo o espectro eletromagnético regiões onde a absorção atmosférica é relativamente pequena. Estas regiões, chamadas janelas atmosféricas, caracterizam-se por uma boa transmitância à REM. Portanto, essas são as regiões onde, praticamente, todas as atividades em sensoriamento remoto podem ser utilizadas com maior facilidade. Na Tabela 1.1 apresentam-se as principais janelas.

TABELA 1.1

PRINCIPAIS JANELAS ATMOSFÉRICAS

Ultravioleta e visível	0,3 - 0,75 $\mu\text{m}$	Espectro ótico
	0,77 - 0,91	
Infravermelho próximo	1,0 - 1,12	
	1,19 - 1,34	
	1,55 - 1,75	
	2,05 - 2,40	
Infravermelho médio	3,50 - 4,16	
	4,50 - 5,00	
Infravermelho termal	8,00 - 9,20	
	10,20 - 12,40	
	17,00 - 22,00	
Microonda	2,06 - 2,22 mm	
	3,00 - 3,75	
	7,50 - 11,50	
	20,00 +	

## b) Espalhamento

Enquanto no processo de absorção a energia de um feixe é absorvida, transformada em outras formas e reemitida a outros comprimentos de onda, no processo de espalhamento a energia de um feixe colimado é removida por mudança de direção. Assim, a energia solar incidente no topo da atmosfera, que se caracteriza por se colimada, isto é, se propaga numa direção bem definida, ao interagir com a atmosfera, pelo processo de espalhamento, gerará um campo de luz difusa, que se propagará em todas as direções.

Dependendo do tamanho dos elementos espalhadores e do comprimento de onda da radiação, pode-se distinguir três tipos de espalhamento:

*Espalhamento molecular ou Rayleigh:* é produzido essencialmente pelas moléculas dos gases constituintes da atmosfera. Ele se caracteriza pelo fato de sua intensidade ser inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação. Assim, a luz azul ( $\lambda \approx 440$  nm) será espalhada cerca de seis vezes mais que a luz vermelha ( $\lambda \approx 700$  nm). Isto explica a coloração azul do céu.

*Espalhamento Mie:* ocorre quando o tamanho das partículas espalhadoras é da ordem do comprimento de onda da radiação. Quando os diâmetros das partículas espalhadoras forem iguais a  $\lambda$ , o espalhamento será proporcional a  $1/\lambda^2$ . No caso dos diâmetros serem iguais a  $3/2$  de  $\lambda$ , o espalhamento será proporcional a  $1/\lambda$ .

*Espalhamento não-seletivo:* ocorre quando os diâmetros das partículas são muito maiores que  $\lambda$ . Neste caso, a radiação de diferentes comprimentos de ondas será espalhada com igual intensidade. A aparência branca das nuvens é explicada por este processo.

Tanto no planejamento da aquisição de dados por sensores remotos, quanto no processo de interpretação, é importante levar em conta o fenômeno de espalhamento, pois a energia coletada pelo sensor não provém somente do alvo, uma vez que a energia espalhada pela atmosfera e outros alvos poderá atingir o sensor, mascarando parcial ou totalmente a informação desejada. Como exemplo, cita-se o fato de que na faixa do espectro visível, ao se imagear, por satélite, a energia proveniente do oceano, 80 a 90% do sinal recebido é causado somente por espalhamento atmosférico.

#### 1.2.4 - SUPERFÍCIES

Na maioria das aplicações de técnicas de sensoriamento remoto, há interesse em identificar, acompanhar ou estudar algum alvo ou fenômeno que se processa na superfície da Terra, ou que, mesmo não sendo de superfície, tenha alguma influência sobre ela. É através da análise das variações espaciais, espectrais e temporais da energia radiante, refletida ou emitida pela superfície de um alvo, que se extraem informações de interesse.

Um dos processos de maior relevância na interação da REM com a superfície dos alvos é o da reflexão, pois a maior parte das informações é obtida através da análise da energia refletida pelos alvos. Embora neste texto se considere a reflexão como um fenômeno essencialmente de superfície, deve-se ressaltar que, dependendo do comprimento de onda da radiação e das propriedades físicas do material, ela é resultante da interação da radiação com as várias camadas de subsuperfície. Por exemplo, devido à boa penetração de radiação de comprimento de onda maiores que 5 metros no solo, a análise da energia refletida permite a avaliação do seu teor de umidade.

Com relação à distribuição espacial da energia refletida por uma superfície, podem-se considerar dois casos. A reflexão especular, causada por superfícies lisas, ou a reflexão difusa, causada pe

las superfícies rugosas. Deve-se observar que esta classificação lisa ou rugosa, atribuída a uma superfície, é dependente do comprimento de onda da radiação e do ângulo de incidência. Assim, uma superfície arenosa, que na faixa do visível se comporta como rugosa, pode parecer lisa na faixa de microondas. Segundo o critério de Rayleigh, considera-se uma superfície como lisa, para determinado comprimento de onda  $\lambda$  da radiação incidente na direção  $\theta$ , quando suas irregularidades médias são de magnitude  $h$ , dada por:

$$h \leq \lambda / 8 \cos \theta \quad (\text{critério de Rayleigh}) \quad (1.16)$$

a) Reflexão especular

Quando a superfície de um alvo pode ser considerada lisa, segundo o critério de Rayleigh, tem-se a reflexão especular. Neste caso, as radiações incidente e refletida, e a normal à superfície, no ponto de incidência, estão todas no mesmo plano e, além disto, a radiação é refletida segundo o mesmo ângulo de incidência (Figura 1.9).

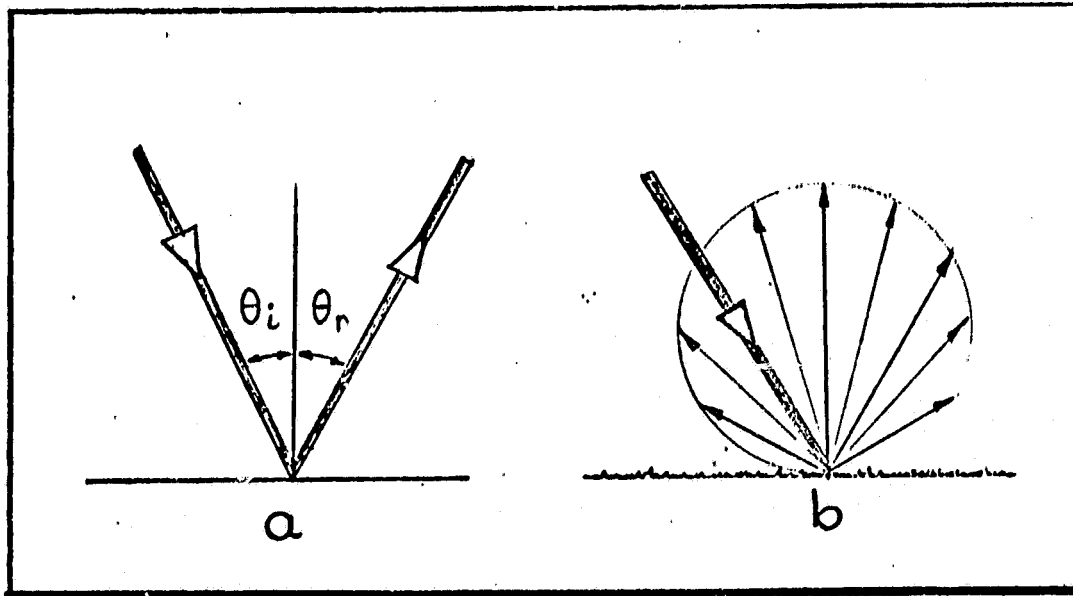


Fig. 1.9 - Reflexão: especular e difusa

A reflectância de uma superfície depende essencialmente de três fatores: ângulo de incidência, índice de refração do alvo e coeficiente de extinção. Quanto menor o ângulo de incidência, menor a porção de energia refletida. Em qualquer ângulo de incidência, a porção de luz refletida é diretamente proporcional ao seu índice de refração, e quanto maior a absorção de uma substância, maior seu coeficiente de extinção e menor sua reflectância. Este é um dos motivos pelo qual os metais são bons refletores.

#### b) Reflexão Difusa

Quando um alvo, devido às dimensões das irregularidades de sua superfície, ângulo de incidência e comprimento de onda da radiação incidente, não satisfaz ao critério de Rayleigh, diz-se que sua superfície é rugosa e que produz reflexão difusa. Ao contrário da reflexão especular, neste caso, a superfície pode refletir radiação em todas as direções, gerando um campo de luz difusa (Figura 1.9b). Pode-se ter radiação sendo refletida na mesma direção de incidência, fenômeno também conhecido por retroespalhamento, de grande importância em aplicações de radar, uma vez que esta energia retroespalhada é a registrada pelo radar.

Em alguns casos, pode-se ter uma mistura de reflexão especular e difusa, mas para todos os efeitos costuma-se considerar como reflexão difusa quando uma porção considerável, da ordem de 25% ou mais, da radiação é refletida difusamente.

*Reflectância hemisférica:* Para a reflexão difusa, pode-se definir a reflectância hemisférica,  $\rho_h$ , como a razão entre a exitância radiante diante de uma superfície e a sua irradiância. Assim:

$$\rho_h = M/E \quad (1.17)$$

onde: M = exitância e E = irradiância.

Superfície Lambertiana: Quando uma superfície é completamente difusa, cada um de seus pontos reflete REM como uma fonte Lambertiana, e o seu efeito conjunto é o de uma superfície Lambertiana, isto é, sua radiância independe do ângulo de visada. Para este caso, pode-se provar que a radiância de uma superfície Lambertiana pode ser obtida, dividindo-se sua exitância por  $\pi$ , isto é,

$$N = M/\pi \quad (1.18)$$

Se se conhece a irradiância do fluxo de radiação incidente sobre um alvo Lambertiano, e pode-se medir sua radiância, sua reflectância,  $\rho_h$ , será dada por:

$$\rho_h = \frac{N\pi}{E} \quad (1.19)$$

### c) Reflectância Espectral

Para os propósitos do sensoriamento remoto, talvez mais importante que as mudanças geométricas/espaciais nos fluxos de REM refletidos, sejam as mudanças introduzidas pelos alvos nas características espectrais do fluxo refletido. Assim, cada alvo em particular ao interagir com a REM incidente modula-a espectralmente, podendo introduzir neste fluxo, significantes variações espectrais. Por exemplo, uma maçã tem a cor vermelha, por refletir, predominantemente, a cor vermelha absorvendo os outros comprimentos de onda do visível. Esta seletividade espectral da reflectância não se manifesta somente no visível; ela pode ser encontrada em todo o espectro eletromagnético, e grande quantidade de informação sobre os alvos pode ser extraída, remotamente, pelo conhecimento da reflectância espectral dos alvos.

O conhecimento dos espectros de reflectância dos diversos materiais permite quantificar e prever a distribuição espectral da REM por eles refletida. Este conhecimento é fundamental para a escolha dos melhores canais ou faixas espectrais, onde algumas características

dos alvos sejam realçadas, ou mesmo para a interpretação de imagens ou dados obtidos por sensores remotos.

Na Figura 1.6 estão representadas as curvas de reflectância espectral média de três importantes tipos de alvos para o sensoriamento remoto do meio ambiente, quais sejam: alvo, vegetação e água. Pode-se ver que cada material apresenta uma curva de reflectância espectral bastante típica, distinguindo-a das demais. A esta reflectância espectral também dá-se o nome de assinatura espectral.

Associando-se a reflectância de um alvo com o nível de cinza de uma imagem fotográfica, isto é, níveis de cinza mais claros representando reflectâncias mais altas e vice-versa, pode-se utilizar a Figura 1.6 para extrair algumas conclusões interessantes. Por exemplo, numa imagem obtida na faixa de  $0,6 \mu\text{m}$ , os níveis de cinza mais escuros representam vegetação. Níveis de cinza um pouco mais claros representam corpos d'água e aqueles ainda mais claros representam solo. Se esta mesma imagem fosse obtida em  $1,0 \mu\text{m}$ , os níveis de cinza mais claros representariam vegetação, os níveis de cinza um pouco mais escuros, solos, e os níveis de cinza bastante escuros representariam corpos d'água.

Assim, na interpretação de imagens multiespectrais, o interprete deve levar em conta as variações de reflectância com o comprimento de onda, para uma correta interpretação dos dados.

#### d) Emissividade

Como já visto anteriormente, pode-se inferir a temperatura de um corpo por meio de medidas remotas da energia por ele emitida, lançando mão da teoria da emissão termal dos corpos negros.

Sabe-se que um corpo negro emite um espectro de REM característico, dado pela lei de Planck, com um máximo de emissão no com

primento de onda  $\lambda$ , dado pela lei de Wien. Assim, por exemplo, se o corpo negro estiver a  $300^{\circ}\text{K}$  ( $27^{\circ}\text{C}$ ), o seu máximo de emissão estará em  $9.6 \mu\text{m}$ . Vê-se, então, que os corpos à temperatura ambiente emitem REM com máxima intensidade dentro da janela atmosférica de  $8$  a  $14 \mu\text{m}$ . Usando-se um radiômetro que opere nesta faixa do espectro, pode-se medir, num intervalo de comprimento de onda, a energia emitida por um alvo. Pode-se agora associar a esta medida a temperatura que um corpo negro deveria ter, para que emitisse, na mesma faixa, idêntica quantidade de energia. A esta temperatura dá-se o nome de temperatura aparente.

Para a maior parte dos materiais, a sua emissividade é praticamente independente da temperatura nas faixas de temperatura ambiente.

Deve-se salientar que a emissividade de um corpo é função do comprimento de onda, e assim, pode-se definir uma emissividade espectral  $\epsilon_{\lambda}$ , como a razão da exitância do corpo num estreito intervalo de comprimento de onda em torno de  $\lambda$ , pela correspondente exitância de um corpo negro à mesma temperatura e no mesmo intervalo. Assim:

$$\epsilon = \frac{M_{\lambda}(\text{material}, ^{\circ}\text{K})}{M_{\lambda}(\text{corpo negro}, ^{\circ}\text{K})} \quad (1.20)$$

Sabendo-se que a emissividade espectral de um corpo é igual à sua absorptância espectral ( $\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$ ) e no caso do material possuir baixa transmitância espectral, pode-se deduzir da equação (1.12) que:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad \text{ou} \quad \epsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1,$$

e, portanto:

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad (1.21)$$

Vê-se que os materiais com alta reflectância, como os metais, possuem baixa emissividade, p.ex., a prata tem  $\epsilon_\lambda = 0,04$  em  $\lambda = 1\mu\text{m}$ ,  $\epsilon_\lambda = 0,03$  para  $\lambda = 5\mu\text{m}$  e  $\epsilon_\lambda = 0,01$  para  $\lambda = 14\mu\text{m}$ . Assim, um radiômetro infravermelho apontado para tal material e operando numa faixa em torno destes comprimentos de onda registrará uma temperatura aparente bem inferior à sua temperatura real, devido à sua baixa emissividade. Se o alvo for uma superfície de água, cuja emissividade espectral vale  $\epsilon_\lambda = 0,986$  na faixa do infravermelho, a sua temperatura real será bastante próxima de sua temperatura aparente.

#### 1.2.5 - SENSORES

A REM refletida ou emitida por um alvo qualquer, desde que convenientemente registrada e analisada, contém uma grande quantidade de informação. Assim, a REM refletida ou emitida por um alvo, sob certas circunstâncias, após incidir sobre o olho humano pode ser transformada em impulso nervoso, que é interpretado pelo cérebro, gerando a sensação da visão. Entretanto, o olho humano é um sensor remoto capaz de responder a uma faixa extremamente estreita do espectro eletromagnético (aproximadamente de 400 a 700 nm). Para notar este fato, basta que se sintonize um receptor de rádio ou televisão, a fim de observar que no mesmo ambiente há a presença de REM em faixas espectrais para as quais o olho humano é totalmente insensível.

Com o desenvolvimento tecnológico, o homem conseguiu ampliar a sua capacidade de "sentir" a REM, desde comprimentos de onda extremamente curtos (raios cósmicos) até comprimentos de onda de centenas de metros, construindo dispositivos sensores que operam em grande parte do espectro eletromagnético.

Assim, pode-se dizer que um sensor remoto é um dispositivo capaz de responder à REM de determinada faixa do espectro eletromagnético, registrá-la e gerar um produto numa forma adequada para ser interpretada pelo usuário.

Convém ressaltar que a REM registrada por um sensor remoto não se deve, exclusivamente, à energia emitida ou refletida pelo alvo de interesse. Essencialmente, dois processos em geral ocorrem, fazendo com que a energia do alvo esteja modificada quando atinge o sensor. Primeiro, todo sensor possui um campo de visada e uma resolução no terreno que pode incluir além do alvo de interesse, a sua vizinhança, que também está emitindo ou refletindo REM em direção ao sensor. Segundo, a atmosfera atua sobre a REM provinda do alvo, atenuando-a seletivamente a adicionando-lhe componentes geradas por retroespalhamento da luz solar.

Vê-se assim que sempre que possível a radiância aparente, medida por um sensor, deve ser corrigida para se obter a radiância inerente do alvo, a qual pode ser relacionada, com maior confiança, às propriedades do alvo.

Existem duas grandes categorias de sensores remotos: ativos e passivos. Os sensores ativos são aqueles que possuem fonte própria de energia, registrando a energia por eles emitida e refletida pelo alvo. Nesta categoria estão incluídos os radares e os lasers, por exemplo. Os sensores passivos não possuem fonte própria de energia, utilizando apenas a energia emitida ou proveniente de outras fontes (p.ex., o Sol) e refletida pelo alvo.

## CAPÍTULO 2

### SENSORES E PRODUTOS

#### 2.1 - RADIÔMETROS

São sensores capazes de medir a intensidade da energia ra-  
diante, proveniente de todos os pontos de uma superfície, dentro do seu  
campo de visada e numa faixa de comprimentos de onda especificado.

Com relação à forma do produto final, os radiômetros po-  
dem ser construídos de maneira a gerar imagens de uma cena ou simples-  
mente medir a radiância proveniente de um objeto para o qual estão apon-  
tados. Estes dois tipos de radiômetros são chamados, respectivamente,  
radiômetros imageadores; e não-imageadores.

Um radiômetro consiste em quatro componentes básicas, co-  
mo apresentado na Figura 2.1.

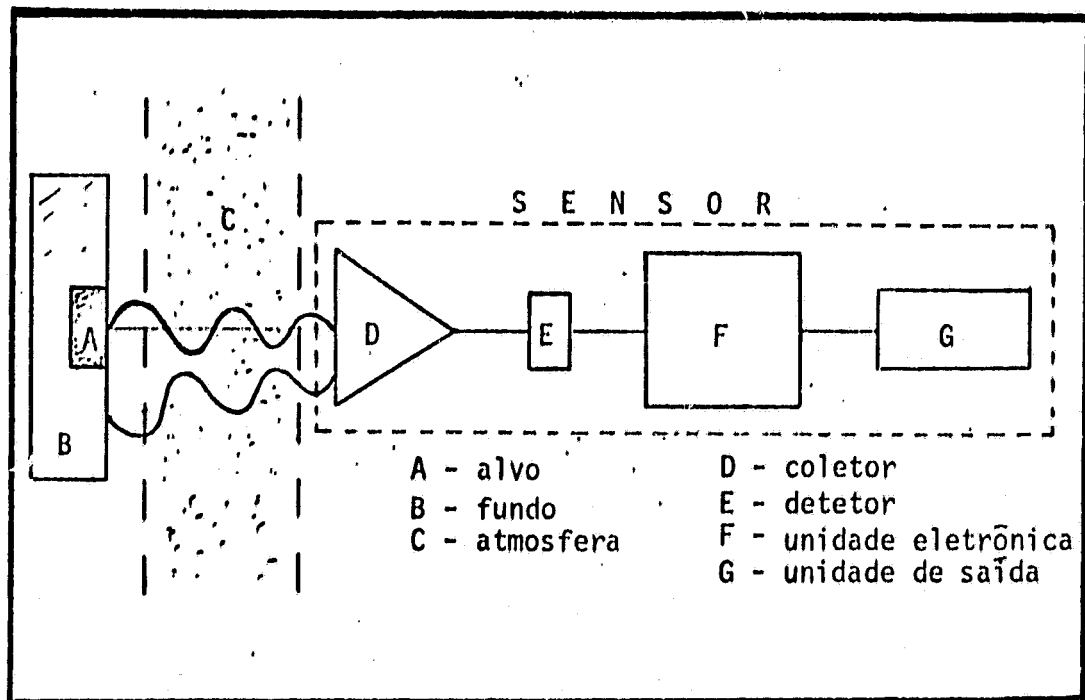


Fig. 2.1 - Componentes básicas de um radiômetro.

A função do coletor é captar a energia radiante proveniente de um alvo, dentro do ângulo de visada fixo, e concentrá-la no detector.

A função do detector, num radiômetro, é converter uma dada quantidade de energia radiante sobre ele incidente, num sinal elétrico proporcional. De acordo com a finalidade para a qual vai se utilizar o radiômetro e com a faixa espectral a ser detectada, é muito importante a escolha do detector mais adequado, pois é nesta componente que a sensibilidade global do sistema é estabelecida.

Existem dois tipos básicos de detectores: os termais e os quânticos. Os termais baseiam-se num aumento de temperatura por absorção de radiação, produzindo uma variação de alguma propriedade do material que pode ser monitorada eletricamente. Nesta categoria incluem-se os termopares e as termopilhas. Os detectores quânticos baseiam-se na geração de portadores de cargas livres, produzidas por interação de fótons com a estrutura eletrônica do material do detector. Têm-se para este tipo de detector, os fototubos, os fotomultiplicadores, os fotocondutores e os fotodiodos. Pelo fato de os detectores termais dependerem de um grau de número de fótons incidentes para produzirem uma modificação perceptível de sinal, e também por possuírem um tempo de resposta relativamente longo, sua sensibilidade, quando comparada aos detectores quântico, é baixa.

Em geral, a sensibilidade dos detectores termais é completamente independente do comprimento de onda da radiação incidente, em oposição à dos detectores quânticos, fortemente dependente do comprimento da onda.

*Unidade eletrônica* - é geralmente composta de um processador de sinal usado para dar um formato adequado aos dados, um amplificador para aumentar o nível do sinal, uma unidade de potência e um painel de controle.

*Unidade de saída* - é constituída de um mostrador e/ou uma unidade de armazenamento dos dados.

Como apresentado na Figura 2.2, o detetor de um sensor é colocado no plano focal do sistema ótico coletor. A distância focal ( $f$ ) deste sistema e o diâmetro do detetor determinam a sua resolução angular, ( $\Omega$ ). A projeção do detetor pelo sistema ótico sobre o alvo determina o elemento de resolução no terreno. Note-se que a resolução angular, ( $\Omega$ ), é uma propriedade inerente do sistema e conseqüentemente, fixa; ao passo que o elemento de resolução no terreno é função da resolução angular e da distância do sensor ao alvo. Assim, o sinal de resposta do radiômetro resulta de um processo de integração (média) das intensidades de radiação, provenientes de todos os pontos do alvo contidos no elemento de resolução do terreno.

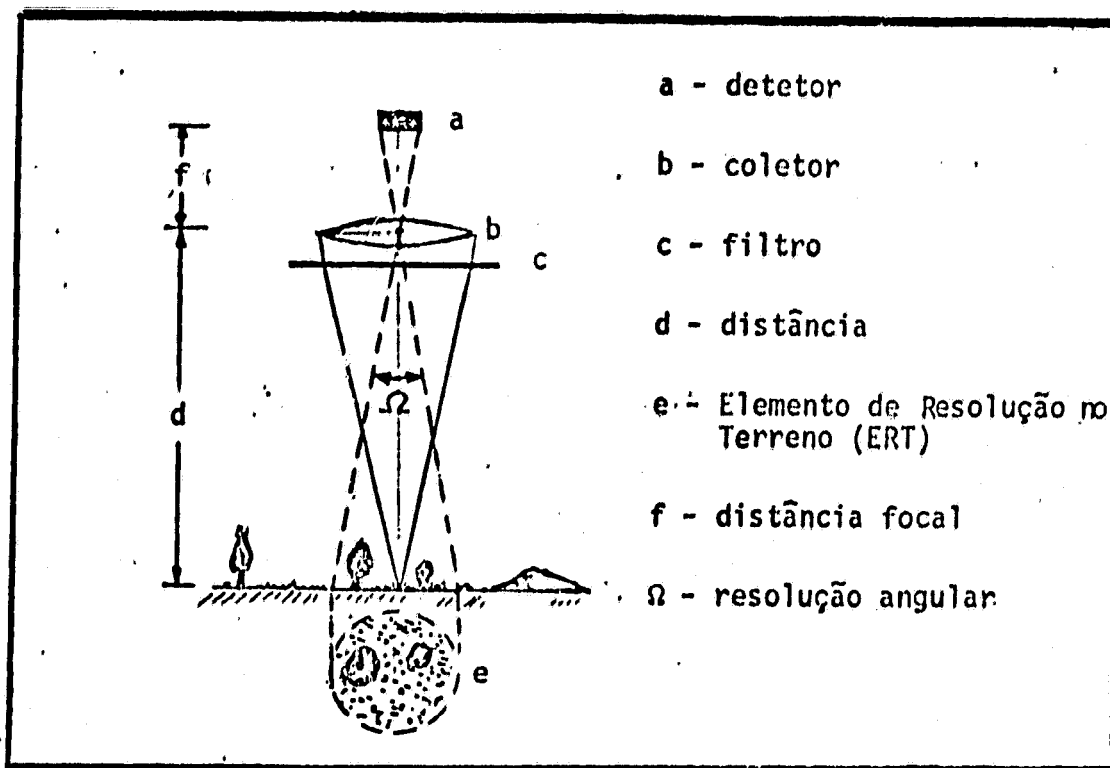


Fig. 2.2 - Elementos formadores da resolução de um sistema sensor.

Pode-se limitar a radiação incidente sobre o detetor a apenas uma estreita faixa de comprimentos de onda de largura  $\Delta\lambda$ , usando para isto um dispositivo chamado filtro. Esta largura de faixa  $\Delta\lambda$  determina a resolução espectral do radiômetro.

Se um radiômetro utiliza um filtro variável, deixando passar, a cada vez, radiação de comprimentos de onda diferentes, ele poderá ser utilizado para levantar a curva espectral da energia refletida ou emitida pelo alvo. A este tipo de radiômetro dá-se o nome de "espectrorradiômetro".

## 2.2 - SENSORES FOTOGRÁFICOS

Apesar do grande avanço ocorrido no desenvolvimento de sensores eletrônicos ("scanner", radar, televisão, etc.), cujas imagens, obtidas em ampla faixa do espectro, podem ser visualizadas em tempo real digitalizadas e processadas automaticamente, os sistemas fotográficos continuam a ser uma ferramenta de indiscutível valor para a aquisição de dados em Sensoriamento Remoto.

Operados a partir de aeronaves e espaçonaves, os sistemas fotográficos têm permitido a obtenção de imagens da superfície da terra, com resolução especial raramente igualada, por outros tipos de sensores. Considerando-se o fato de que fotografias são obtidas na região visível do espectro e de suas proximidades, o seu conteúdo é de mais fácil interpretação, pois apresenta uma aparência mais natural com relação à forma, ao tamanho, à cor, etc., dos objetos fotografados.

A câmara fotográfica, considerada de uma forma simplificada (Figura 2.3), compreende um magazine protegido da luz exterior, onde o filme sensível é armazenado e posicionado para a exposição. Um sistema óptico, constituído de objetiva e filtro, é utilizado para projetar sobre a superfície do filme uma imagem espectralmente conveniente da cena fotografada. Um sistema obturador e um diafragma determinam a duração e o brilho da imagem projetada sobre o filme.

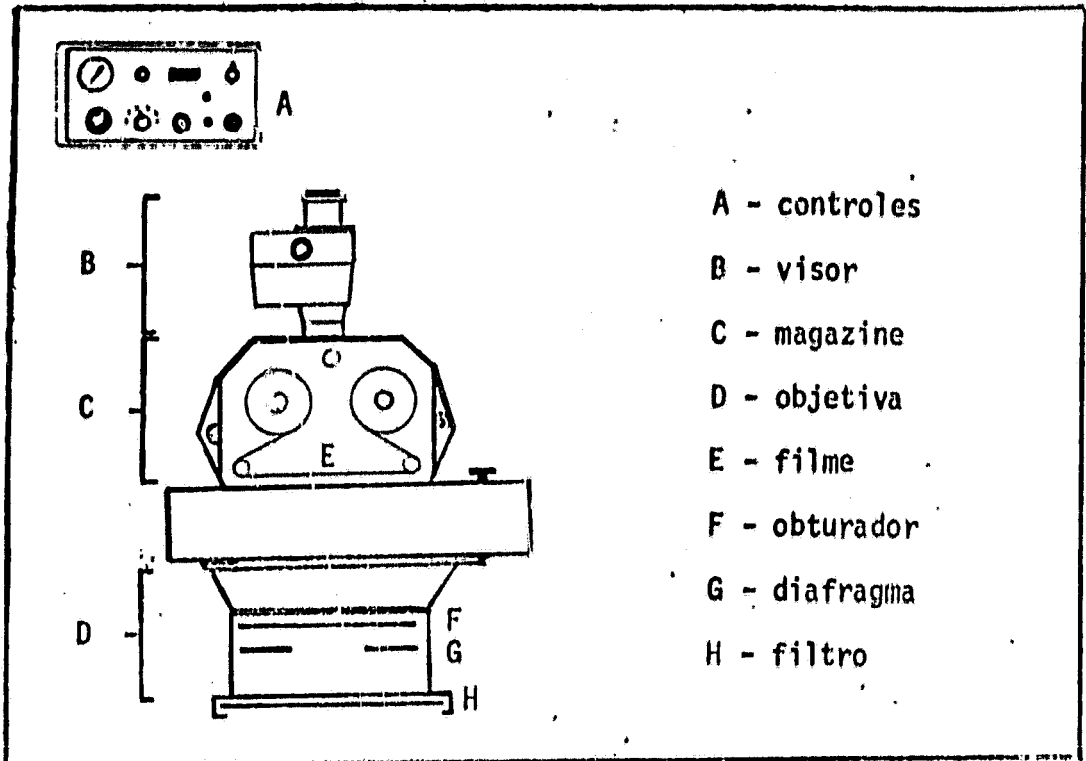


Fig. 2.3 - Partes de uma câmara fotográfica aérea.

Partindo dessa configuração básica, diversas câmaras têm sido desenvolvidas e utilizadas em Sensoriamento Remoto, destacando-se:

- a) as câmaras métricas, cujas imagens, por sua precisão geométrica, permitem a construção de mapas planimétricos e topográficos da área fotografada; e
- b) os sistemas multiespectrais, que são conjuntos de câmaras munidas de filtros e filmes especiais, para a aquisição de fotografias nas faixas espectrais mais adequadas ao estudo dos alvos de interesse.

Os filmes fotogrficos so detetores que respondem  quantidade de energia radiante ou exposio que recebem. A exposio ( $\epsilon$ ) sobre cada ponto do filme  dada por:

$$\epsilon = \frac{\pi N}{4f^*2} t \quad (2.1)$$

onde  $N$   a radincia dos correspondentes pontos da cena,  $f^*$   o ndice do diafragma e  $t$   a durao da exposio, regulada pelo obturador.

Aps o processamento (revelao), a resposta do filme  exposio recebida  representada pela sua densidade ptica ( $D$ ), definida por:

$$D = \log \frac{1}{\tau} \quad (2.2)$$

onde  $\tau$   a transmitncia do filme na posio considerada.

Uma maneira conveniente de representar a relao entre a densidade ptica e a exposio, para um determinado tipo de filme e processamento,  atravs de um grfico como o da Figura 2.4, denominada *curva caracterstica*.

A projeo da parte linear da curva caracterstica sobre o eixo horizontal define um intervalo de exposies que o filme pode registrar sem deformaes de contraste, enquanto a declividade da curva (gama do filme) indica se a transformao exposio-densidade ser feita com perda ou ganho de contraste.

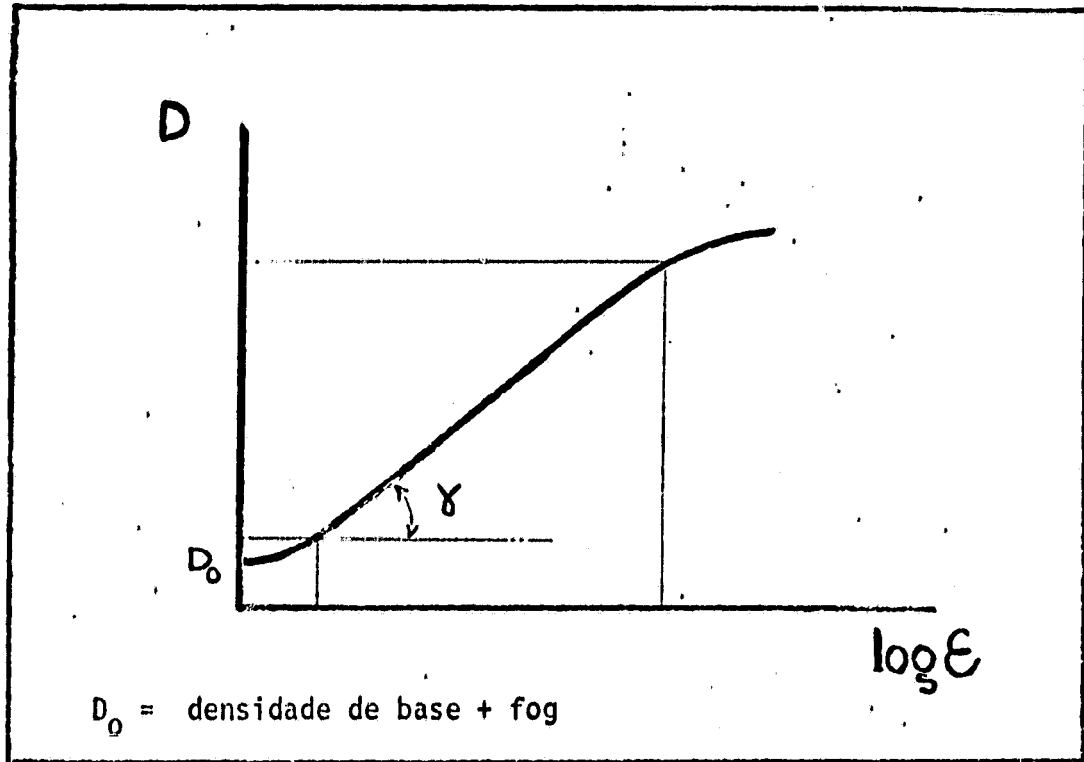


Fig. 2.4 - Curva característica de um filme P&B.

Um filme não responde da mesma forma a exposições espectralmente diferentes; essa propriedade, expressa pela *sensitividade espectral* do filme, é definida como o inverso da exposição (em  $\text{erg/cm}^2$ ) necessária para produzir uma determinada densidade, ou seja:

$$S_{\lambda} = \frac{1}{e_{\lambda}} \quad (\text{para um dado valor de } D) \quad (2.3)$$

A Figura 2.5 mostra a curva de sensitividade espectral de dois tipos de filmes (P&B) para o nível de densidade 1.

Atualmente, são produzidos filmes aéreos com sensitividade espectral compreendida entre o ultravioleta ( $\sim 250\text{nm}$ ) e o infravermelho próximo ( $\sim 900\text{nm}$ ).

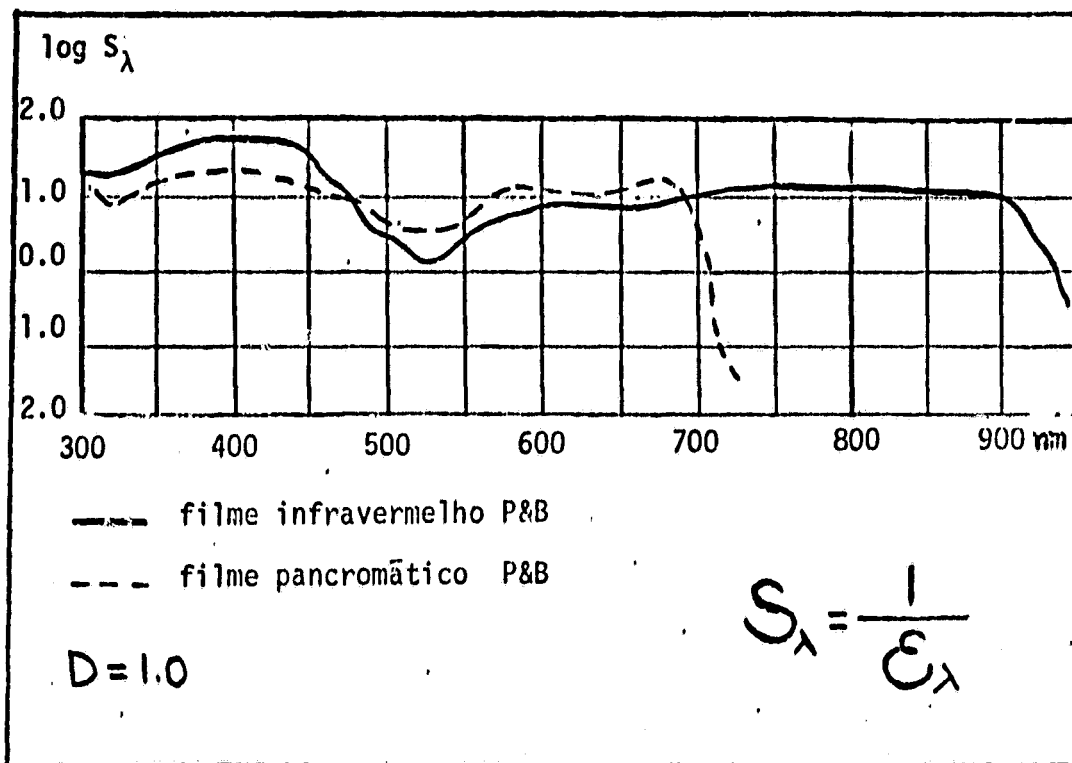


Fig. 2.5 - Sensitividade espectral.

Considerada de forma integral, a sensibilidade de um filme costuma ser indicada pela sua rapidez. Valores de rapidez constituem um meio de comparar a sensibilidade de diferentes filmes e são também úteis na definição dos parâmetros de exposição  $f^*$  e  $t$  a serem ajustados na câmara. Por exemplo, os filmes aéreos fabricados pela Eastman Kodak Co. costumam ter a sua rapidez indicada por um valor denominado EAFS ("Effective Aerial Film Speed").

A eficiência de um filme em registrar pequenos detalhes da cena é indicada pela sua *resolução*.

Testes de resolução costumam ser feitos fotografando-se um painel contendo conjuntos de barras (pretas e brancas) de diversos tamanhos. O menor conjunto identificado permite calcular a resolução do filme em número de linhas (barras) por milímetro. A resolução que

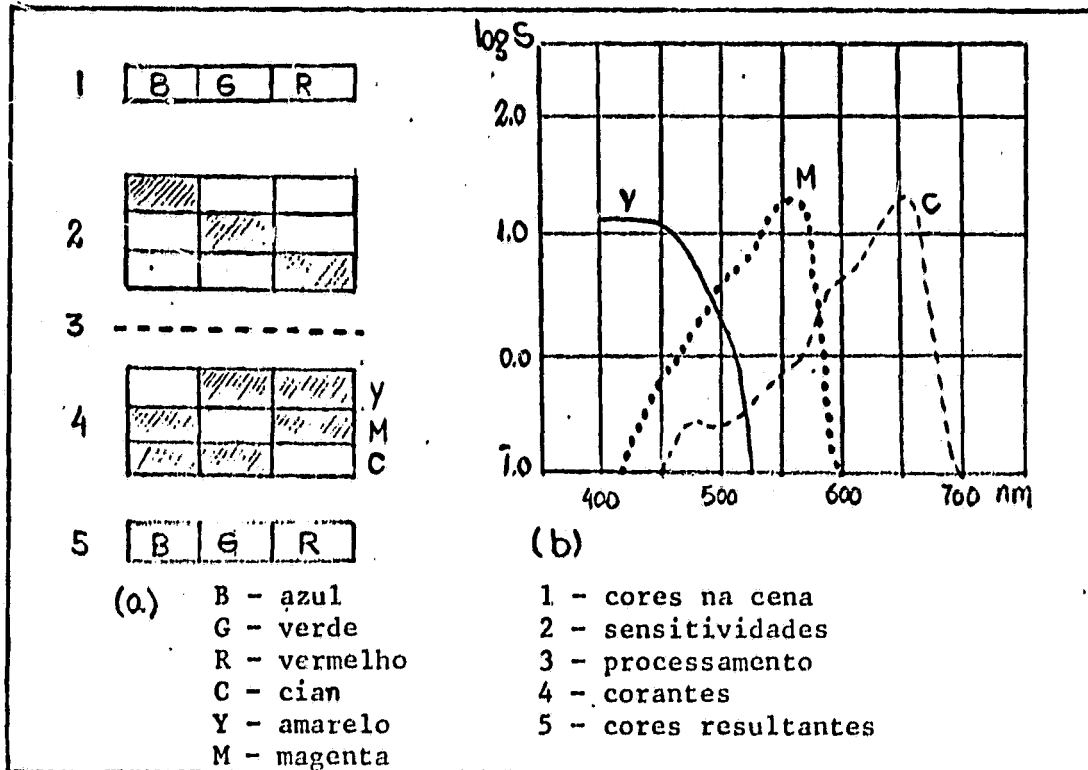
se consegue obter com um determinado filme depende de vários fatores, dentre os quais são importantes o contraste da cena e a rapidez do filme. Geralmente, a resolução conseguida é maior para alvos de alto contraste, fotografados com filmes lentos.

Filmes preto e branco, após processados e copiados, representam, através de densidades ópticas (níveis de cinza), os diversos valores de radiância presentes na cena; filmes coloridos, acrescentam cor a essas densidades, de forma que a imagem obtida apresenta grande semelhança visual com a cena. Um filme colorido é construído com a utilização de três camadas de emulsões, cujas sensibilidades se estendem às faixas espectrais correspondentes a três cores primárias: azul, verde e vermelho (Figura 2.6a). Durante o processamento, a prata reduzida em cada emulsão é substituída por pigmentos coloridos, cuja cor é complementar da faixa espectral considerada (Figura 2.6b). O resultado obtido é um negativo colorido da cena fotografada.

Na continuidade do processo, o negativo é copiado em material fotográfico (papel ou transparência) com as mesmas características básicas, ocorrendo então nova inversão de cor e densidade, resultando em uma imagem de grande semelhança visual com a cena.

O resultado posterior também pode ser conseguido diretamente no filme utilizado para fotografar o alvo, quando este é do tipo reversível. Durante o processamento de um filme reversível, os halos sensibilizados são reduzidos à prata e removidos do filme; os remanescentes são expostos novamente à luz branca, reduzidos e substituídos pelos pigmentos coloridos complementares das suas faixas espectrais de sensibilidade (Figura 2.7 a e b). O resultado pode ser examinado por transparência ou projeção.

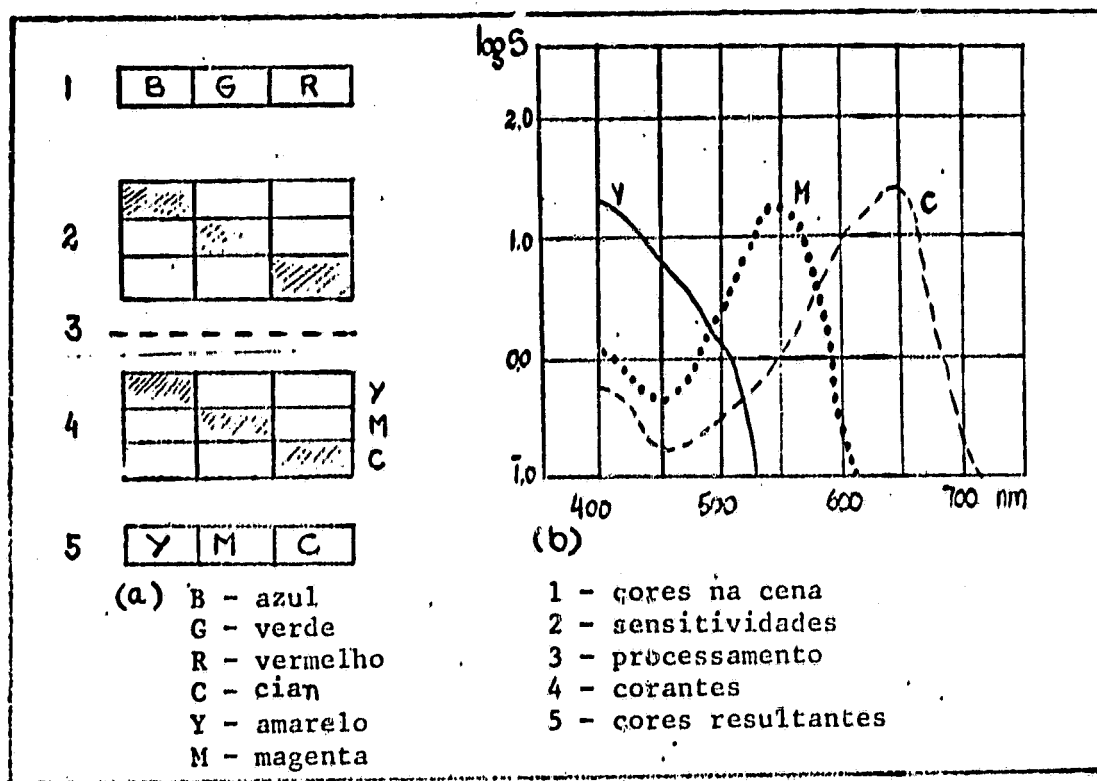
ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY



a) Formação das cores.

b) Curvas de sensibilidade espectral.

Fig. 2.6 - Filme colorido negativo.



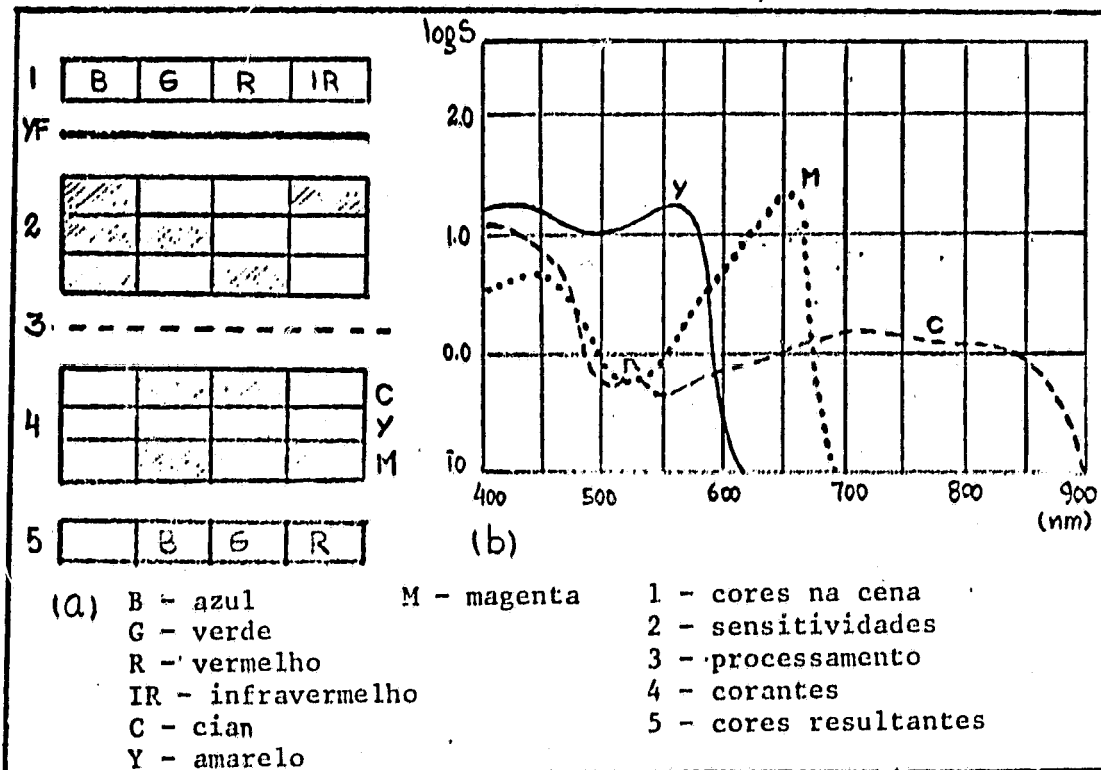
a) Formação das cores.

b) Curvas de sensibilidade espectral.

Fig. 2.7 - Filme colorido reversível.

Outro tipo de filme reversível, de extensa utilização em sensoriamento remoto, é o infravermelho falsa-cor. Este filme é construído com três emulsões sensíveis ao verde, ao vermelho e ao infravermelho. Como as três emulsões são também sensíveis ao azul, um filtro amarelo (menos azul) é de utilização obrigatória para a exclusão dessa cor na tomada da foto. Durante o processamento, os pigmentos coloridos - azul, verde e vermelho - são associados às emulsões verde, vermelha e infravermelha, respectivamente. A Figura 2.8 a e b mostra os resultados obtidos. Ainda que este tipo de filme não apresente semelhan

ça visual com respeito às cores da cena, a sua utilização em problemas onde a região espectral infravermelha (700 a 900nm) contenha informações significativas a respeito das propriedades do alvo é de grande eficiência.



a) Formação das cores.

b) Curvas de sensibilidade espectral.

Fig. 2.8 - Filme infravermelho falsa-cor.

A Tabela 2.1 descreve alguns tipos de filmes aéreos e suas características de maior importância.

TABELA 2.1

TIPOS DE FILMES E SUAS CARACTERÍSTICAS

FILME(1)	EAFS(2)	RESOLUÇÃO ( $\ell$ /mm)	TIPO
HIGH DEFINITION A.F	80	630/250(3)	PANCROMÁTICO/NEGATIVO
PLUS-X AEROGRAPHIC	200	100/50	PANCROMÁTICO/NEGATIVO
TRI-X AEROGRAPHIC	640	80/20	PANCROMÁTICO/NEGATIVO.
INFRARED AEROGRAPHIC	200	80/32	INFRAVERMELHO P & B/NEGATIVO
AEROCROME INFRARED	40(4)	63/32	INFRAVERMELHO/FALSA-COR/ REVERSÍVEL
AEROCOLOR NEGATIVE	100	80/40	COLORIDO/NEGATIVO
EKTACHROME MS AEROGRAPHIC	32	80/40	COLORIDO/REVERSÍVEL

OBS: (1) Fabricados pela EASTMAN KODAK CO.

(2) Luz do dia, sem filtro.

(3) O primeiro número correspondente a um contraste de 100/1 e o segundo a 1,6/1.

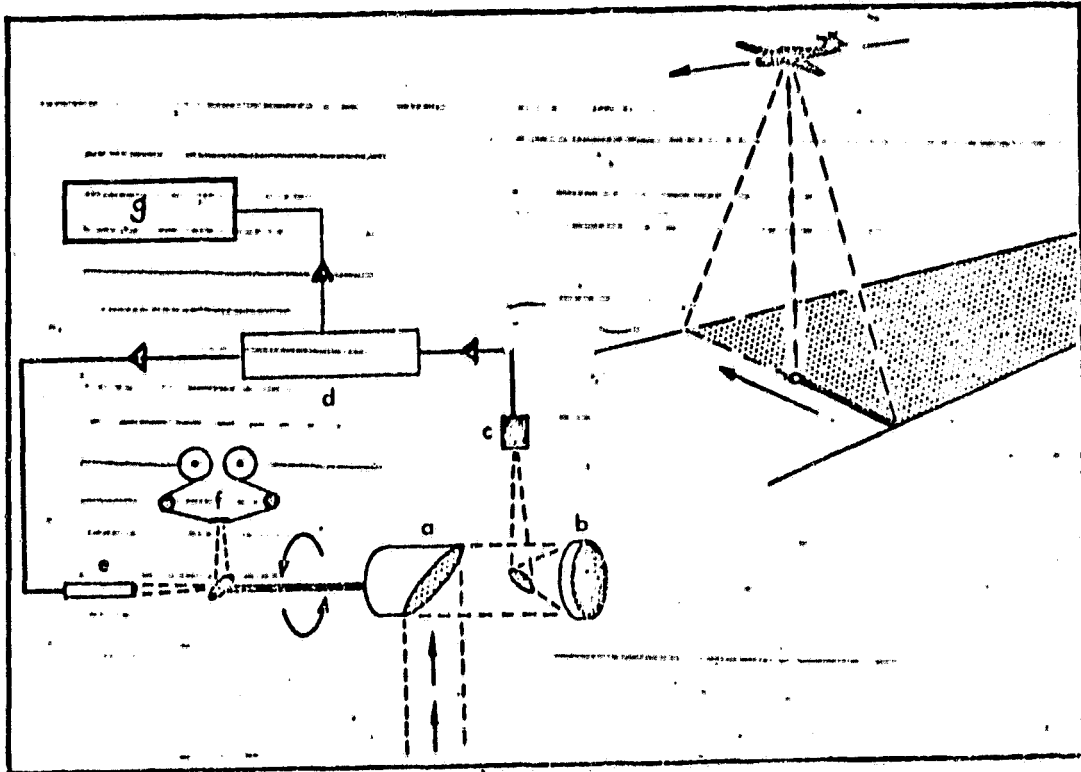
(4) Luz do dia e filtro Wratten 12 (amarelo).

### 2.3 - RADIÔMETRO IMAGEADOR (SCANNER)

Se, no caminho ótico do coletor de um radiômetro instalado a bordo de uma plataforma (avião, satélite, etc.), for colocado um espelho, que gira ou oscila na direção perpendicular ao deslocamento da plataforma, o elemento de resolução no terreno se deslocará, gerando uma linha de varredura. Se o movimento do espelho for sincronizado com a velocidade da plataforma, a cada rotação ou oscilação do espelho, uma nova linha adjacente de varredura será gerada. Dessa forma, pode-se ter uma imagem do terreno situado abaixo da plataforma.

Na Figura 2.9, apresenta-se o esquema de um radiômetro imageador. Neste caso, cada linha de varredura pode ser armazenada por um gravador de fita magnética ou gravada sobre um filme fotográfico. No caso da gravação sobre o filme, a energia radiante proveniente de cada elemento de resolução no terreno é convertida, através do detetor e do sistema de processamento eletrônico, num sinal elétrico que, por sua vez, modula a intensidade luminosa de uma pequena lâmpada. A luz dessa lâmpada varre o filme fotográfico por meio de um pequeno espelho, que gira fixo ao eixo do espelho principal. O deslocamento do filme é feito de tal forma que, a cada rotação ou oscilação do espelho, uma nova linha de varredura é gravada sobre ele.

Na maioria dos radiômetros, a área do detetor define o campo instantâneo de visada (resolução) do sistema, e um filtro é colocado na trajetória da radiação para restringir esta radiação a um intervalo de comprimentos de onda escolhidos. Pode-se transformar um radiômetro imageador em multiespectral, isto é, capaz de observar a mesma cena em várias faixas espectrais, através de separadores de feixe (prismas, redes de difração, etc.). Desta forma, detetores separados, localizados num conjunto de detetores, observam o mesmo elemento de resolução da cena em diferentes faixas espectrais.



- a) Espelho giratório;
- b) espelho parabólico;
- c) detector;
- d) módulo de processamento eletrônico;
- e) lâmpada;
- f) filme;
- g) gravador de fita magnética.

Fig. 2.9 - Radiômetro imageador.

## 2.4 - RADAR

O Radar é um sensor ativo que opera na faixa de rádio ou microondas. O termo "radar" é uma sigla proveniente de Radio Detection and Ranging, que poderia ser traduzido como Detecção e Localização por Ondas de Radio.

O princípio básico de operação de um radar é a emissão de um sinal de rádio; este sinal é refletido por um objeto distante, retornando ao sensor onde é processado para a extração do tempo decorrido entre a emissão e a recepção. Sabendo-se que o sinal se propaga à velocidade da luz, a distância  $x$  a um objeto pode ser calculada por  $x = ct/2$ , onde  $t$  é o tempo decorrido entre a emissão e a recepção.

Na maioria dos radares, os pulsos são emitidos a frequências bastante altas, da ordem de 3 GHz (1 GHz =  $10^9$  Hz), possuindo cada pulso a duração da ordem de  $10^{-6}$  segundos. Considerando-se que a radiação se propaga com a velocidade de  $3 \times 10^8$  m/seg no ar, para um objeto situado a 150 km de distância, o pulso retornará ao sistema em 1/1000 seg.; se o objeto estivesse a 150 m, este tempo seria reduzido para  $10^{-6}$  segundos (1 microssegundo). Então, considerando-se dois objetos separados por uma distância inferior a 150 metros, na direção perpendicular à linha de voo, para vê-los separados, é necessário medir intervalos de tempo menores que  $10^{-6}$  segundos.

Uma das vantagens oferecidas pelo sistema de radar é a de que, sendo um sensor ativo, pode operar à noite; porém a vantagem mais importante é a de poder ser operado praticamente sob qualquer condição atmosférica, pois a transmitância para a REM, nesta faixa de comprimentos de onda, mesmo em nuvens, é de quase 100%. O único fator meteorológico capaz de influenciar fortemente o sinal de retorno do radar é a chuva.

São descritos agora os componentes básicos de um sistema de radar imageador, conhecido como radar de visada lateral ou SLAR

("Side Looking Airbone Radar"). Neste tipo de radar, a aeronave carrega uma antena, cuja dimensão longitudinal é coincidente com a direção de vôo. Esta antena tem a propriedade de emitir pulsos na direção normal ã direção de vôo, os quais são dirigidos para um dos lados da aeronave (Figura 2.10).

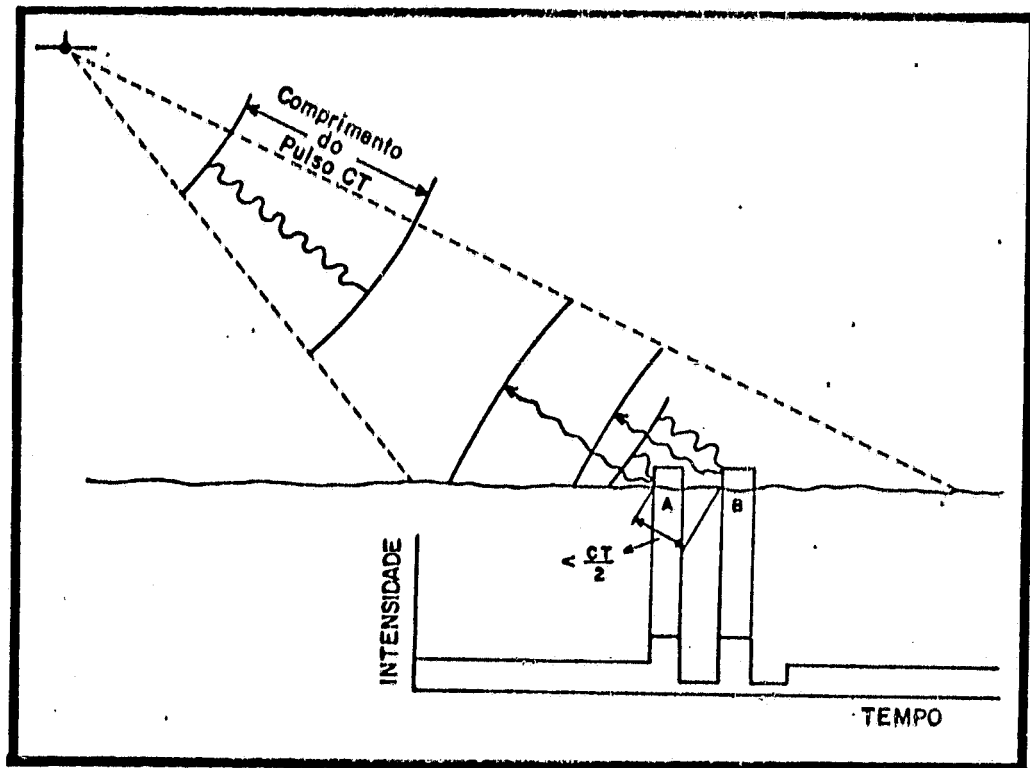


Fig. 2.10 - Radar de Visada Lateral.

Devido ã geometria do pulso, em cada emissão, uma extensa e estreita faixa no terreno normal ã direção de vôo é iluminada pelo feixe de radar; os retornos de radar, produzidos por reflexão ou retroespalhamento de alvos situados a diferentes distâncias do receptor, são separados no tempo quando registrados.

Um ponto luminoso de um tubo de raios catódicos sincronizado e modulado em intensidade oscila, produzindo uma linha de varredura em um filme que avança com uma velocidade tal que, com o movimento da aeronave, cada linha de varredura corresponde a uma nova faixa imageada do terreno.

Para o SLAR podem-se definir duas resoluções: a longitudinal, determinada pela largura do feixe na direção de voo; e a transversal, na direção de varredura. O elemento de resolução longitudinal é proporcional a  $\lambda/D$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $D$  é a dimensão da antena. Conclui-se então que se pode melhorar a resolução, aumentando a frequência da radiação ou o tamanho da antena. O aumento da antena fica limitado por fatores aerodinâmicos da aeronave, e o aumento da frequência diminui a transmitância atmosférica, afetando o sinal de retorno.

Como visto anteriormente, a resolução transversal depende essencialmente da precisão em cronometrar os tempos de retorno. Pode-se mostrar que, para pulsos de duração  $\tau$ , dois elementos de superfície poderão ser resolvidos, se estiverem separados por uma distância maior que  $c\tau/2$ .

Seria interessante ressaltar que, ao contrário dos sistemas passivos, tem-se neste caso controle sobre vários parâmetros físicos envolvidos no imageamento. Pode-se, por exemplo, escolher o comprimento de onda, a frequência dos pulsos, a intensidade de cada pulso, o plano em que oscila o campo elétrico da onda eletromagnética (isto é, sua polarização), de modo a ressaltar certas características dos alvos que, de outra forma, não seriam percebidas.

Como pode ser notado pela Figura 2.10, somente aqueles alvos que se apresentam rugosos a ponto de gerar um padrão de reflexão difusa ou retroespalhamento, ou que não sendo rugosos, estão orientados normalmente ao feixe incidente, podem produzir um sinal de retorno. Deve-se entretanto levar em conta que, nestes comprimentos de onda,

segundo o critério de Rayleigh, alguns objetos que na faixa do visível são considerados rugosos, na de radar se comportam especularmente. Por exemplo, paredes de tijolos, superfícies de concreto e pavimentação de asfalto se comportam desta forma quando iluminados pelo feixe de radar, isto é, refletem o feixe em alguma direção bem definida, em geral para longe da antena. Dessa forma, a menos que estejam orientadas normalmente ao feixe, se mostrarão escuras na imagem.

Corpos d'água, como por exemplo, lagos, rios e oceanos, aparecerão escuros numa imagem de radar, a menos que, por efeito de onda em suas superfícies, se comportem rugosamente, espalhando luz em direção ao sensor. Vê-se assim que este tipo de sensor pode ser usado para o monitoramento do estado do mar, parâmetro de grande importância para a segurança de navegação.

De maneira geral, bons condutores elétricos, tais como os metais, espalham mais fortemente as ondas de radar. Condutores moderadamente bons, tais como materiais naturais com umidade, espalham mais intensamente que os secos, maus condutores.

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

### CAPÍTULO 3

#### SISTEMA LANDSAT

O Sistema LANDSAT foi desenvolvido com o objetivo de permitir a aquisição de dados espaciais, espectrais e temporais sobre a superfície da Terra, de forma global, sinóptica e repetitiva.

Lançados em 1972 (L1), 1975 (L2) e 1978 (L3), os satélites da série LANDSAT (anteriormente conhecidos como ERTS) conduzem basicamente dois tipos de sensores: um imageador multiespectral de varredura de 4 canais (5 no L3) e um sistema de televisão de 3 canais (1 no L3).

Deslocando-se em uma órbita quase polar e heliossíncrona, os satélites LANDSAT permitem que os dados sobre uma mesma região da Terra sejam adquiridos a cada 18 dias, em condições semelhantes de iluminação.

Os dados coletados, quando transmitidos às estações terrenas de recepção, são gravados e processados, tornando-se disponíveis aos usuários do sistema sob a forma de imagens multiespectrais fotográficas ou gravadas em fitas compatíveis com computador. A Figura 3.1 mostra a configuração do Sistema, utilizada pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE.

#### 3.1 - CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE

O Sistema LANDSAT utiliza como satélite uma plataforma do tipo NIMBUS (satélite meteorológico), onde são instalados os sensores e os demais subsistemas destinados à gravação e transmissão de dados, medição e controle de atitude e temperatura, retransmissores, etc. A potência para funcionamento do sistema é conseguida através dos painéis solares que convertem energia solar radiante em elétrica. A Figura 3.2 apresenta a configuração do Satélite LANDSAT.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

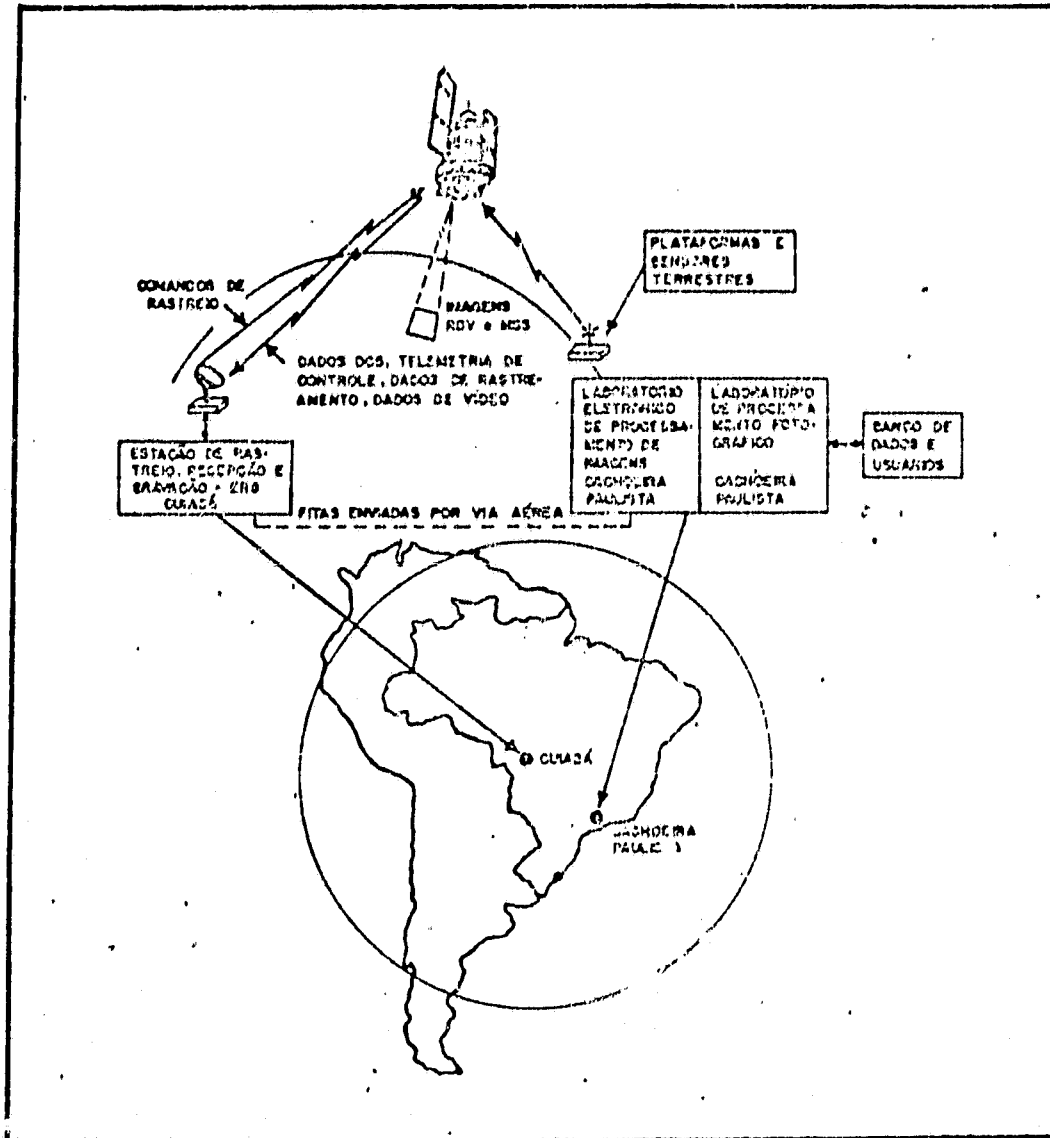


Fig. 3.1 - Configuração do Sistema LANDSAT, utilizada pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

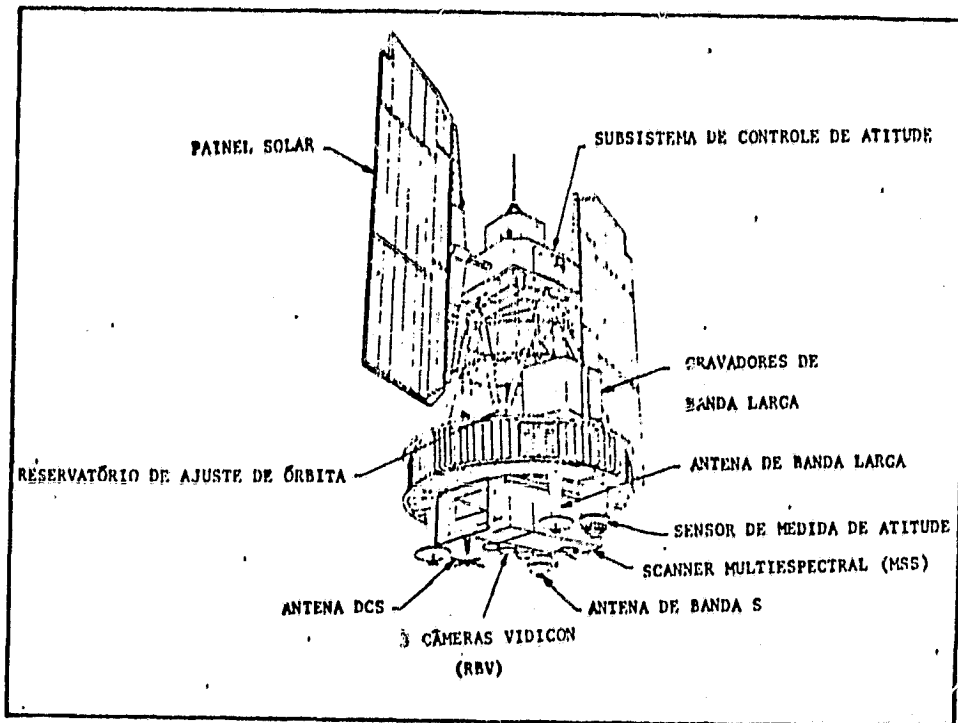


Fig. 3.2 - Configuração do satélite LANDSAT.

PESO: 960 kg

ALTURA: 3,0 m

DIÂMETRO: 1,5 m

LARGURA MÁXIMA: 4,0 m (com os painéis solares abertos)

### 3.2 - CARACTERÍSTICAS ORBITAIS

O Satélite LANDSAT desloca-se em órbita geocêntrica, circular e polar com períodos de 103 minutos e a 920 km de altitude (Figura 3.3). A órbita é também heliossíncrona, isto é, o ângulo sol-terra-satélite permanece constante ( $37,5^{\circ}$ ), o que garante condições semelhantes de iluminação, ao longo do ano, na área imageada (Figura 3.4).

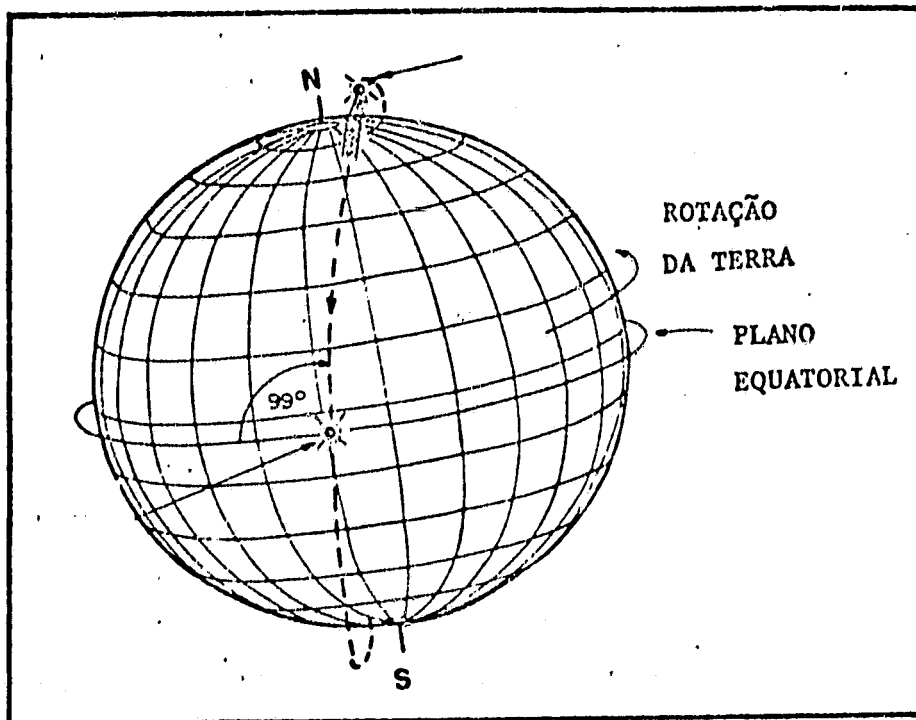


Fig. 3.3 - Órbita do satélite LANDSAT.

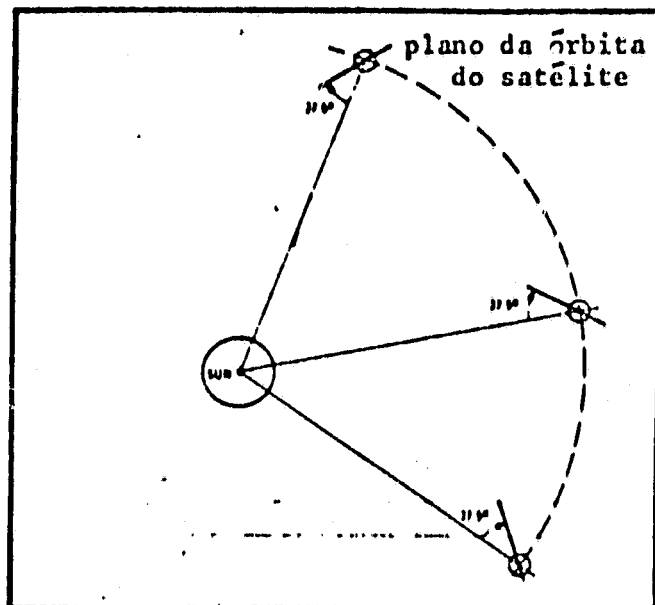


Fig. 3.4 - Órbita heliossíncrona do satélite LANDSAT.

Deslocando-se de norte para sul, na parte iluminada, o satélite cruza o equador a cada 103 minutos; nesse intervalo de tempo, a Terra gira 2760 km (no equador), que é a distância entre as projeções de duas órbitas consecutivas. Ao fim de 24 horas, 14 órbitas são realizadas; entretanto, as órbitas do dia seguinte aparecem deslocadas 160 km em relação às correspondentes do dia anterior. No 19º dia, o deslocamento desaparece e recomeça um novo ciclo (Figura 3.5).

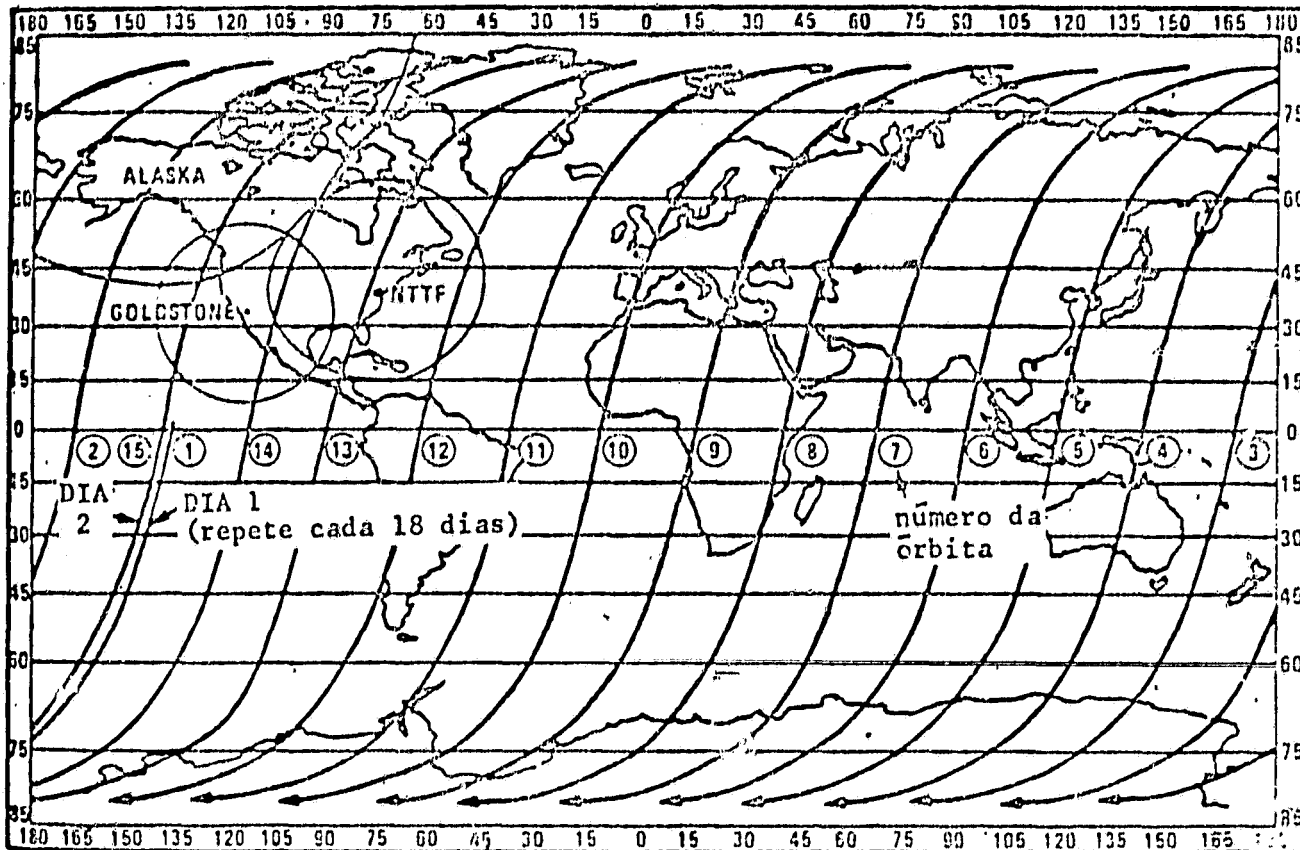


Fig. 3.5 - Órbitas do LANDSAT para um dia de recobrimento.

DADOS:

Semi eixo maior: 7300 km

Inclinação:  $99^{\circ}$  (com o equador)

Período: 103 min.

Cruzamento do equador: 9h 30 min. (hora local)

Ciclo de cobertura: 18 dias

Duração do ciclo: 251 revoluções

Distância entre órbitas adjacentes: 159 km (no equador)

Distância entre órbitas sucessivas: 2760 km (no equador)

Altitude: 920 km

Velocidade do ponto Nadir: 6,46 km/s

(Os dados são aproximados e representam valores típicos)

### 3.3 - SISTEMA IMAGEADOR MULTIESPECTRAL - MSS ("MULTISPECTRAL SCANNER SYSTEM")

A Figura 3.6 mostra a configuração do sistema imageador MSS, cuja varredura, perpendicular à trajetória, é conseguida por meio de um espelho oscilante, com um campo de visada de  $11,6^{\circ}$ . O sistema permite a obtenção de linhas de varredura, na superfície, de aproximadamente 185 km.

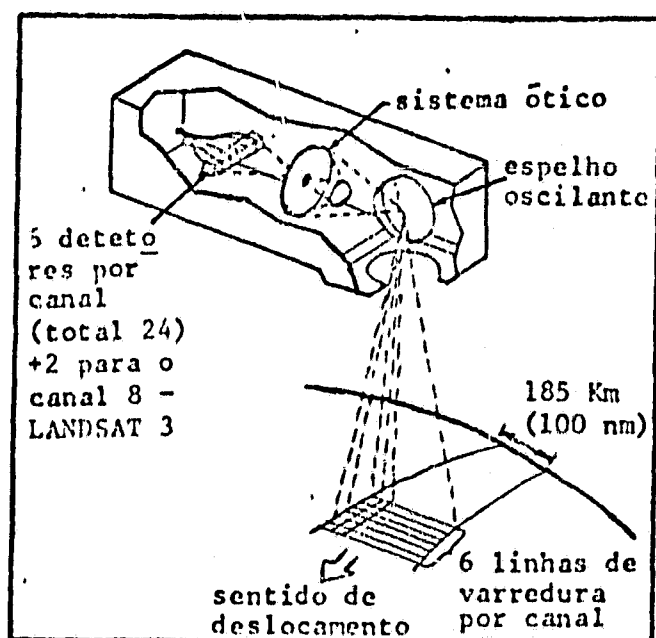


Fig. 3.6 - Sistema imageador MSS-LANDSAT.

A radiação proveniente da cena, após a reflexão no espelho oscilante, é focalizada pelo sistema óptico sobre uma matriz de 24 terminais de fibras ópticas (Figura 3.7), de forma que, cada terminal recebe o fluxo de radiação proveniente de uma área de  $79\text{m} \times 79\text{m}$  na superfície, área esta denominada "Elemento de Resolução no Terreno" (ERT).

Conduzido pelas fibras, o fluxo de radiação é então decomposto, por meio de filtros, em 4 conjuntos, nas seguintes faixas espectrais ou canais:

Canal 4 de 0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$

Canal 5 de 0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$

Canal 6 de 0,7 a 0,8  $\mu\text{m}$

Canal 7 de 0,8 a 1,1  $\mu\text{m}$

Atendendo a seguir os detetores, em número de 6 por canal, a radiação é então convertida em um sinal elétrico de intensidade proporcional à radiância da porção da superfície incluída no ERT correspondente. O sinal, que pode variar entre 0 e 4 volts, é então quantizado entre  $n_1$  níveis que assumem valores de 0 a 63, sendo em seguida transmitido à Terra ou, eventualmente, gravado para transmissões posteriores.

### 3.3.1 - FORMAÇÃO DO "PIXEL" ("PICTURE ELEMENT")

O arranjo da matriz de terminais, vista na Figura 3.7, permite que, durante a oscilação do espelho, 6 linhas sejam varridas, de oeste para leste, na superfície. A oscilação do espelho tem um semi período ativo (varredura) de 33 ms e, durante o seu retorno, os deteto res são expostos às fontes internas para calibração. Durante a varredu ra, o nível do sinal de cada detetor é amostrado a cada 9,95  $\mu\text{s}$ ; como nesse intervalo de tempo o ERT se desloca apenas 56 m no sentido da var redura, a cada elemento de resolução da imagem ou "pixel" deve-se asso ciar uma área de 56 m x 79 m, na superfície (Figura 3.8).

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

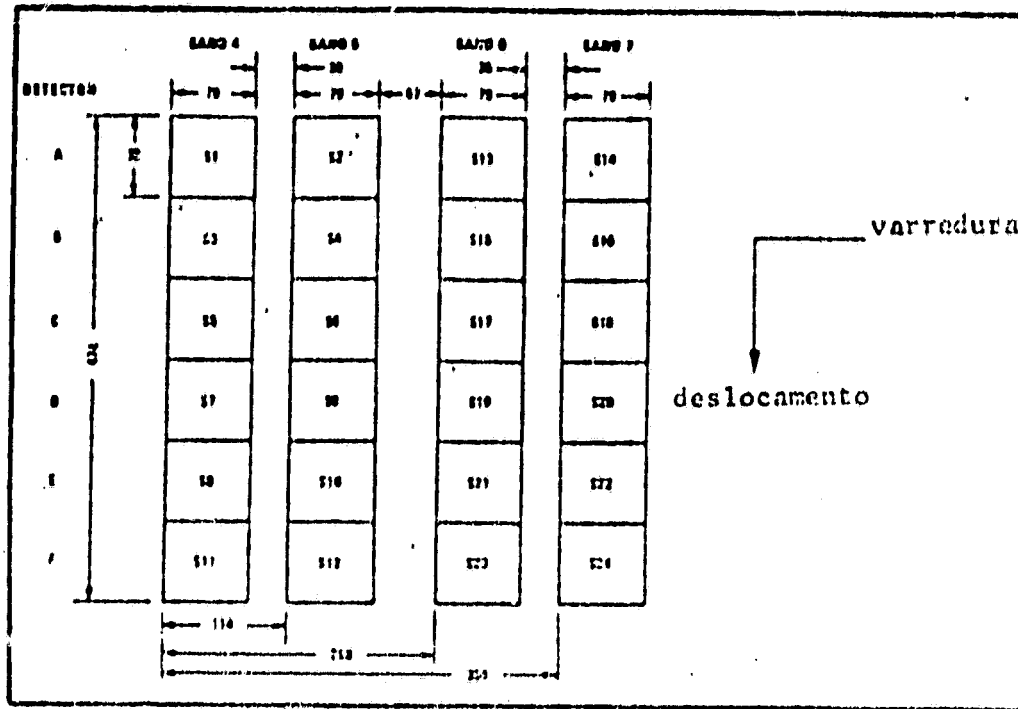


Fig. 3.7 - Geometria da matriz de terminais de fibras ópticas do MSS -LANDSAT 1 e 2.

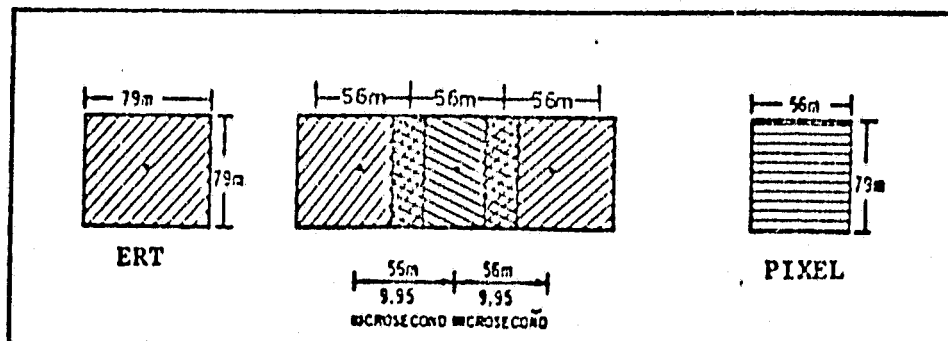


Fig. 3.8 - Relação entre as áreas "PIXEL" e ERT.

### 3.3.2 - FORMAÇÃO DA IMAGEM

O fluxo de dados provenientes do Sistema MSS é transformado em uma imagem, pela justaposição das linhas de varredura, no sentido do deslocamento. Usualmente, a imagem correspondente a cada canal é formada por 2352 linhas, de 3240 "pixels" cada, abrangendo uma área de 185 km x 185 km na superfície.

As características orbitais do LANDSAT permitem que essas imagens apresentem recobrimento lateral de 14,0% no equador, aumentando em direção aos pólos (Tabela 3.1).

TABELA 3.1

#### RECOBRIMENTO LATERAL DAS IMAGENS MSS LANDSAT

LATITUDE (GRAU)	RECOBRIMENTO LATERAL DAS IMAGENS (%)
0	14,0
10	15,4
20	19,1
30	25,6
40	34,1
50	44,8
60	57,0
70	70,6
80	85,0

*Canal Termal* - ao MSS do LANDSAT 3 foi incorporado um quinto canal (canal 8) que permite a aquisição de imagens da distribuição de temperatura na superfície da Terra. Operando na faixa de 10,2  $\mu\text{m}$  a 12,6  $\mu\text{m}$ , onde é máxima a exitância termal média da superfície e mínima a atenuação atmosférica, a configuração das fibras ópticas no plano focal do sistema óptico permite a obtenção de um ERT de 238 x 238 m, que o intervalo de amostragem, para os dois únicos detetores, reduz para um "pixel" de 167 m x 238 m na imagem.

#### Alguns dados sobre o sistema MSS/LANDSAT

##### Canais/resolução espectral

MSS 4: 0,5 - 0,6 $\mu\text{m}$	}	- LANDSAT 1, 2 e 3.
MSS 5: 0,6 - 0,7 $\mu\text{m}$		
MSS 6: 0,7 - 0,8 $\mu\text{m}$		
MSS 7: 0,8 - 1,1 $\mu\text{m}$		
MSS 8: 10,2 - 12,6 $\mu\text{m}$	-	LANDSAT 3.

Varredura na superfície: 185 km.

Varredura angular:  $\pm 5,8$  (campo de visada).

Resolução na superfície (ERT): 79 m x 79 m (MSS 4, 5, 6, 7).  
238 m x 238 m (MSS 8).

Semiperíodo de varredura: 36,7 ms.

Período ativo de amostragem: 33,0 ms.

Intervalo de amostragem por detetor: 9,95  $\mu\text{s}$  (MSS 4, 5, 6, 7).

Número de amostragem por linha de varredura: 3300.

Quantização: 0 a 63 níveis (0 a 4 volts).

Resolução na imagem ("PIXEL"): 56 m x 79 m (MSS 4, 5, 6, 7).  
167 m x 238 m (MSS 8).

Formato da imagem: 2340 linhas x 3240 colunas ("PIXELS").

Superposição lateral: 14% (no equador).

### 3.4 - SISTEMA DE TELEVISÃO RBV ("RETURN BEAM VIDICON")

Os satélites LANDSAT 1 e 2 são equipados com um conjunto de três câmaras de televisão do tipo RBV, que permitem a aquisição de imagens da superfície da Terra nas seguintes faixas espectrais:

Canal 1: 0,475 a 0,575  $\mu\text{m}$

Canal 2: 0,580 a 0,680  $\mu\text{m}$

Canal 3: 0,690 a 0,830  $\mu\text{m}$

Utilizando objetivas de 126,0 mm, as três câmaras são alinhadas de forma a imagear simultaneamente, a cada 25,0 segundos, uma área de 185 km x 185 km na superfície da Terra (Figura 3.9).

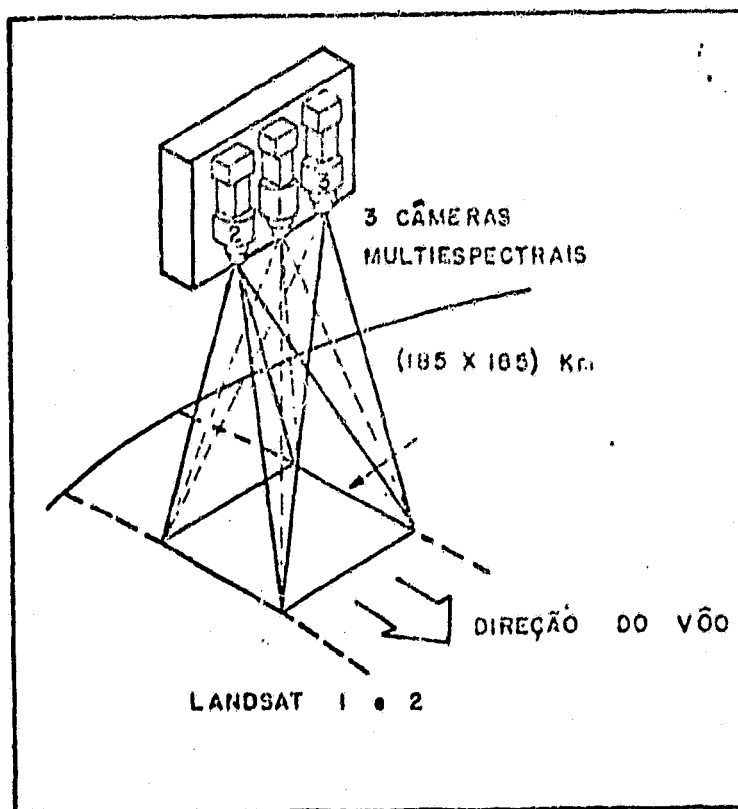


Fig. 3.9 - Configuração do Sistema RBV - LANDSAT 1 e 2.

Em cada câmara, um obturador permite que durante 5,6 ms uma imagem, espectralmente filtrada da cena, seja projetada sobre a superfície foto-sensível do tubo RBV. Em seguida, a superfície do tubo é explorada por um feixe de elétrons, para a detecção das variações de voltagem ali induzidas pelas variações de brilho de imagem. Os sinais obtidos, uma vez amplificados, são transmitidos à Terra, onde são gravados e, posteriormente, processados para a geração da imagem.

O sistema de televisão do LANDSAT-3 é constituído de duas câmaras RBV, que operam na faixa espectral de 0,505 a 0,750  $\mu\text{m}$ .

Utilizando objetivas de 236,0 mm, o novo sistema teve a sua resolução melhorada (de 80 m para 40 m); entretanto, a duplicação da distância focal reduziu a área imageada por cada câmara de 98 km x 98 km; desta forma, o intervalo entre exposições teve que ser reduzido para 12,5 segundos, de forma a obter a mesma cobertura que as câmaras empregadas nos LANDSAT 1 e 2. Assim, quatro imagens ou subcenas RBV/3 são necessárias para a composição de uma cena MSS (Figura 3.10).

#### Alguns dados sobre o Sistema RBV/LANDSAT

##### canais/resolução espectral

RBV1: 0,475 - 0,575 $\mu\text{m}$	}	- LANDSAT 1, 2.
RBV2: 0,580 - 0,680 $\mu\text{m}$		
RBV3: 0,690 - 0,830 $\mu\text{m}$		
RBV: 0,505 - 0,750 $\mu\text{m}$		- LANDSAT 3.

Objetiva: (3) 126,0 mm (L1, L2).

(2) 236,0 mm (L3).

Intervalo de aquisição: 25 s (L1, L2).

12,5 s (L3).

Tempo de exposição: 5,6 ms (ajustável).

Área imageada: 185 km x 185 km (L1, L2).

98 km x 98 km (L3).

Resolução: 80 m (L1, L2).

40 m (L3).

Recobrimento: Lateral: 14 km (no equador) } - (L1, L2).  
Longitudinal: 25 km

Lateral: 25 km (entre cenas no equador) }  
Lateral: 14 km (entre subcenas) } (L3)  
Longitudinal: 25 km

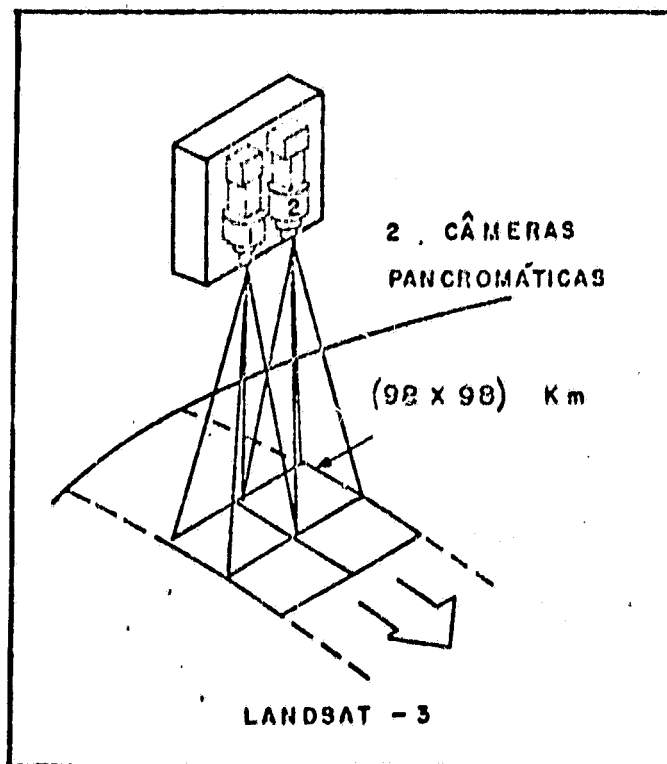


Fig. 3.10 - Configuração do Sistema RBV - LANDSAT 3.

### 3.5 - CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS MSS-LANDSAT

As imagens MSS constituem uma valiosa fonte de informações para a pesquisa e controle de recursos naturais. Entretanto, para sua eficiente interpretação, é importante que as características espaciais, espectrais e temporais de seu conteúdo sejam bem compreendidas.

Os diversos tipos de alvos naturais exibem comportamento espectral diferenciado, como pode ser visto na Figura 3.11, onde a reflectância de amostras de solo, de água e de vegetação é apresentada juntamente com as faixas espectrais dos canais MSS. É importante notar que certos canais apresentam maior grau de contraste entre estes alvos, e as imagens correspondentes devem, em princípio, favorecer a sua diferenciação.

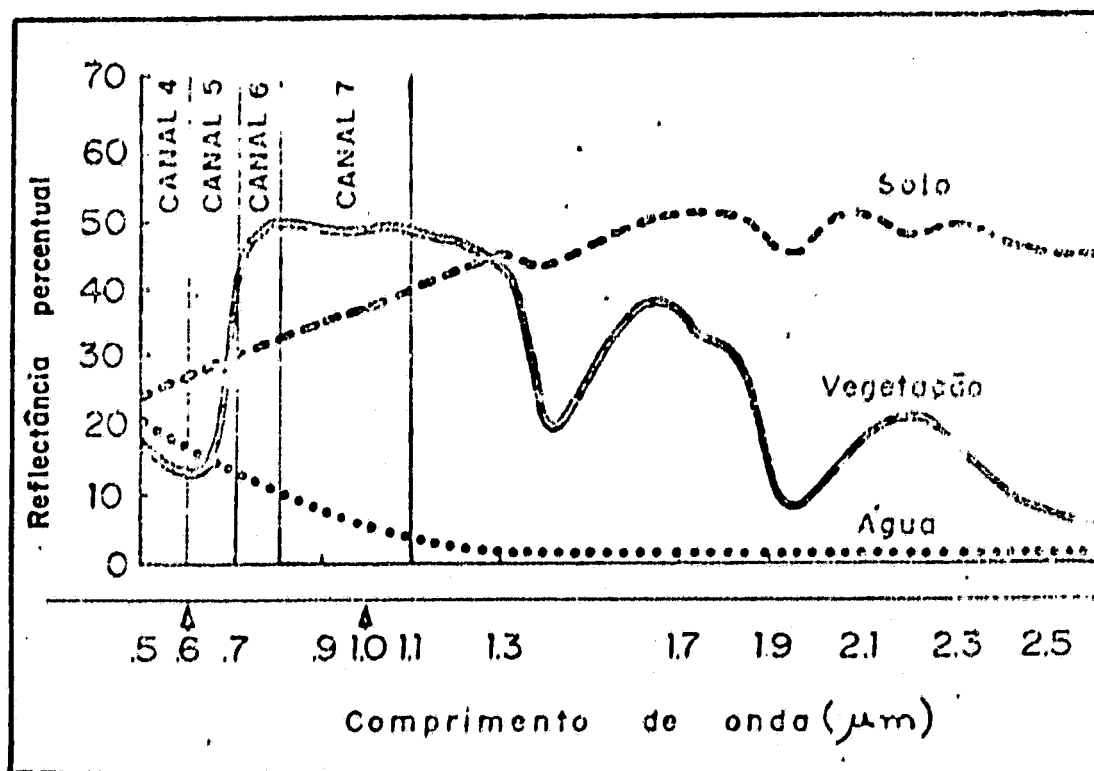


Fig. 3.11 - Reflectância espectral de alvos naturais e canais MSS-LANDSAT.

Entretanto, deve-se considerar que radiômetros imageados registram, não a reflectância ( $\rho$ ), mas a radiância dos alvos incluídos no seu campo de visada instantâneo, o qual abrange não só o ERT, mas também a massa de ar entre o alvo e o sensor.

Lembrando-se que a radiância  $N$  (em  $W/m^2$  sr) de uma superfície ideal (Lambertiana) é dada por:

$$N = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (3.1)$$

onde  $\rho$  é a reflectância e  $E$ , a irradiância (em  $W/m^2$ ) sobre o alvo, não é difícil perceber que a radiância observada na imagem MSS, sob a forma de níveis de cinza, pode apresentar variações devidas às alterações tanto na reflectância como na irradiância sobre o alvo, cujo valor depende, entre outros fatores, da altura solar. Para o caso do LANDSAT, apesar da órbita heliossíncrona, as diversas passagens do satélite sobre uma mesma região encontram, durante o ano, valores de altura solar que dependem da época e da latitude do lugar (Figura 3.12).

O nível de cada "pixel" das imagens MSS corresponde ao valor da radiância do ERT respectivo. Esta por sua vez representa um valor médio das feições presentes na área, de 79 m x 79 m, do elemento de resolução. Assim, para que um "pixel" se destaque dos demais, de sua vizinhança, é preciso que alguma característica presente no ERT altere o seu valor em pelo menos uma unidade; isso explica o fato de estradas e rios, de dimensões consideravelmente menores que a área do elemento de resolução, poderem ser perfeitamente detectados nas imagens MSS.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

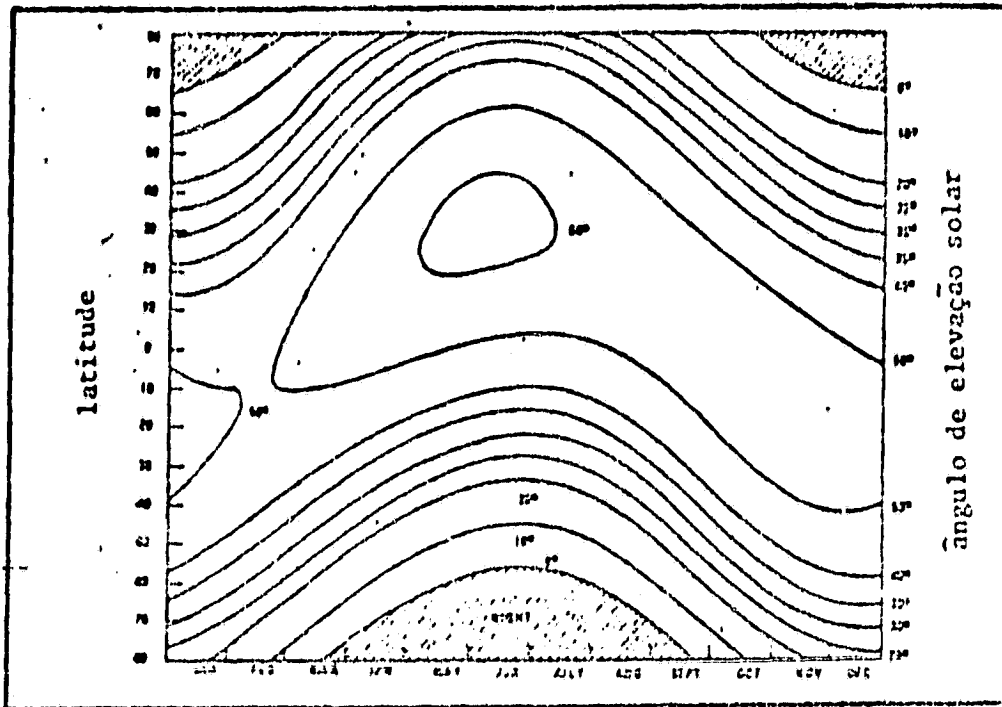


Fig. 3.12 - Altura solar em diferentes épocas do ano e latitudes.

Os efeitos de absorção e do espalhamento da atmosfera entre o satélite e a superfície modificam os níveis de radiância registrados nas imagens MSS. Devido ao caráter espectralmente seletivo desses fenômenos, os 4 canais são afetados de forma diferenciada. Assim, o retroespalhamento atmosférico da radiação solar, em direção ao satélite, tende a aumentar os valores de radiância registrados nos canais baixos (4 e 5), enquanto a absorção atmosférica tende a diminuir os níveis de radiância registrados nos canais altos (6 e 7), como mostra a Figura 3.13.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

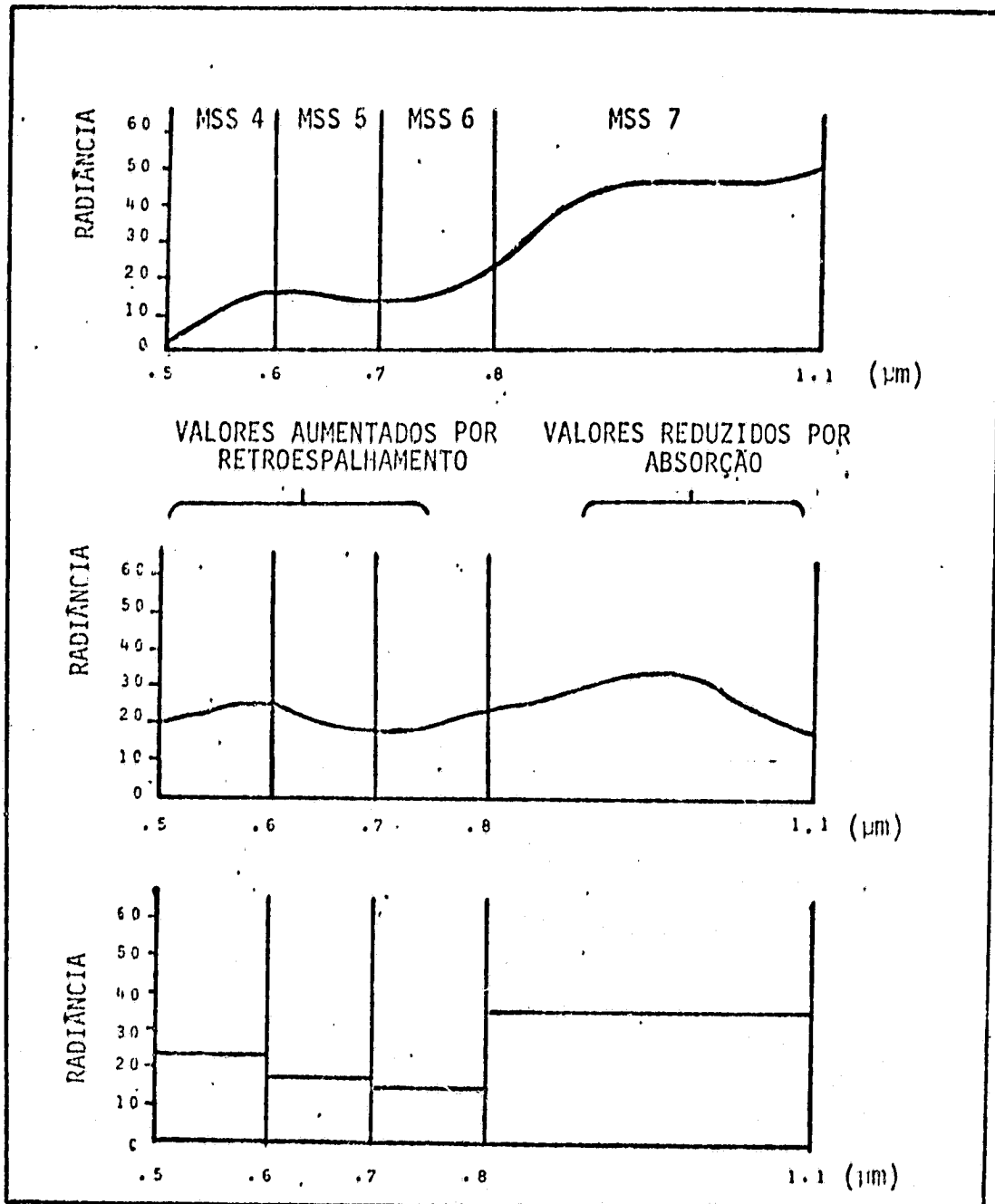


Fig. 3.13 - Influência atmosférica na aquisição dos dados MSS-LANDSAT.

### 3.6 - RECEPÇÃO E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT

*Recepção e Gravação* - O sistema de recepção e gravação dos dados LANDSAT do INPE encontra-se instalado em Cuiabá-MT, local que, por ser o centro geográfico da América do Sul, permite o recobrimento da maioria de seus países.

O Sistema de Cuiabá, através de sua antena de rastreamento, realiza a recepção e grava as imagens geradas pelo MSS e RBV, bem como dos dados de telemetria (altitude, atitude, etc.), ao longo do segmento da órbita ao alcance da estação. Em seguida, as fitas gravadas (fitas HDDT) são enviadas ao Laboratório de Processamento de Imagens, em Cachoeira Paulista - SP.

*Processamento* - sobre o Brasil existem 36 órbitas-padrão (base), que são recobertas em 18 dias. Para as finalidades de processamento, cada órbita é dividida em cenas cujos centros, denominados pontos, são equidistantes 25 segundos com relação ao tempo de geração de dados pelo satélite. Então, cada cena pode ser identificada por um par de números base/ponto.

As fitas HDDT, RBV e MSS são processadas para a conversão dos dados em formas mais convenientes aos usuários, tais como imagens fotográficas ou fitas compatíveis com o computador (CCT). Inicialmente, os dados são processados eletronicamente, por computador, visando a correção das distorções causadas pelos fatores que afetam a qualidade geométrica e radiométrica da imagem.

*Processamento dos dados MSS* - no caso do MSS, a correção radiométrica visa equalizar a resposta dos detetores de cada canal do imageador, evitando o efeito de "stripping" (linhas de intensidades diferentes para alvos homogêneos).

As correções geométricas devem ser efetuadas de forma a eliminar as distorções introduzidas na imagem por fatores inerentes ao sistema, tais como: variações de atitude ("roll", "pitch", "yaw"), velocidade e altitude; rotação da Terra ("skew"), etc., e ainda colocar a imagem no sistema de projeção conveniente.

Os dados gravados em fita CCT sofrem apenas correção radiométrica, enquanto as imagens fotográficas sofrem correções radiométricas e geométricas.

*Processamento dos dados RBV* - os dados RBV, disponíveis somente na forma de imagens fotográficas, sofrem também correções radiométricas e geométricas; entretanto, as distorções são de origem diferentes das do MSS.

Geometricamente, a imagem é corrigida, tomando-se por base uma matriz de 9 x 9 marcas fiduciais gravadas na superfície do tubo RBV. A correção radiométrica tem por objetivo equalizar a resposta das diferentes áreas da superfície sensível do tubo RBV, evitando o efeito de "shading" (sombreamento de áreas homogêneas).

*Produtos fotográficos* - os dados MSS e RBV, após as correções geométricas e radiométricas, são gravados eletronicamente em filmes fotográficos (1ª. geração), a partir dos quais são reproduzidas as imagens disponíveis aos usuários.

Usualmente, são disponíveis os seguintes produtos:

<u>Tamanho Nominal</u>	<u>Escala</u>	<u>Apresentação</u>	
MSS	50 mm	1/3704000	Transparência positiva ou <u>ne</u> gativa.
	185 mm	1/1000000	Transparência positiva (colo <u>ri</u> da ou P&B).
	185 mm	1/1000000	Cópia em papel (colorida ou P&B).
	370 mm	1/500000	Cópia em papel (colorida ou P&B).
	740 mm	1/250000	Cópia em papel (P&B).
RBV	50 mm	1/1963000	Transparência positiva ou <u>ne</u> gativa.
	196 mm	1/500000	Transparência positiva.
	196 mm	1/500000	Cópia em papel.
	393 mm	1/250000	Cópia em papel

As imagens fotográficas MSS e RBV possuem anotação que identificam suas condições de aquisição e processamento, como pode ser visto na Figura 3.14.

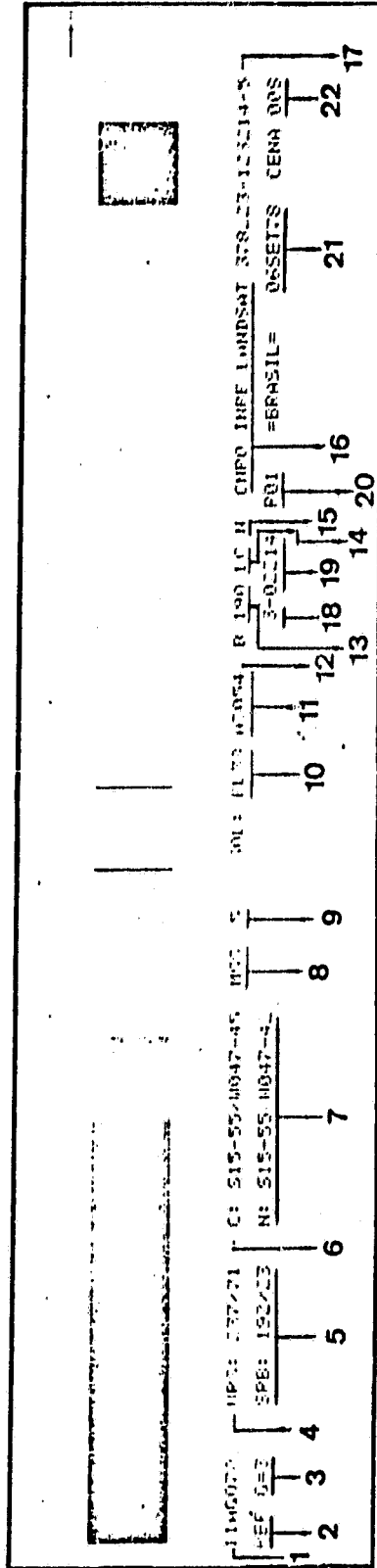


Fig. 3.14 - Formato de anotação das imagens fotográficas MSS e RBV.

1. Data de aquisição de imagem.
2. Tipo de projeção: PEF = Perspectiva Espacial por Faixas (Space Strip Perspective).
3. Nível de correção geométrica.
  - 1 = Apenas remoção de distorções do sistema de geração do filme;
  - 2 = Correções que levam em conta as características orbitais da passagem do satélite.
  - 3 = Inclusão das correções relacionadas aos movimentos próprios do satélite (atitude) durante a passagem.
4. Código de base/ponto (path/row) no sistema universal de referência (Worldwide Reference System).
5. Código de base/ponto no sistema de referência brasileiro (SRB).
6. Coordenadas do centro da imagem.
7. Coordenadas do nadir do satélite.
8. Dispositivo sensor.
9. Banda espectral da imagem MSS ou subcena RBV.
10. Elevação do sol.
11. Azimute do sol.
12. Tipo de fita de dados orbitais utilizada.
  - B = ajustada (Best Fit)
  - P = prevista
13. Direção azimutal do deslocamento do satélite.
14. Ganho (L ou H = baixo ou alto) e codificação (L ou C = linear ou comprimida) do sensor.
15. Tipo de calibração radiométrica.
  - N = normal
  - U = unitária
  - = não calibrado
16. Identificador da Estação de Terra.
17. Identificador da imagem.
18. Número de série do satélite.
19. Número da órbita correspondente a esta passagem do satélite.
20. Número do processamento que gerou esta cena.
21. Data do processamento.
22. Número da cena.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. *Manual of remote sensing*. Falls Church, VA, 1975, V.1.
- CATO, G.A. Basic principles of Earth resource sensors. In: SHAHROKHI, F. ed. *Remote sensing of Earth resources*. Tullahoma, TN, University of Tennessee, c 1972, V.1, p. 64-80. Technical paper select from Conference on Earth Resources Observation and Information Analysis System.
- FLEAGLE, R.G.; BUSINGER, J.A. *An introduction to atmospheric physics*. New York, Academic, 1963. V.5.
- HOLZ, R.K. *The surveillant science; remote sensing of environment*. New York, Houghton Mifflin Company, 1973.
- KONDRATYEV, K.Y. *Radiation in the atmosphere*. New York, Academic, 1969.
- LINTZ Jr., J.; SIMONETT, D.S. *Remote sensing of environment*. Reading, MA, Addison Wesley, 1976.
- MCCARTNEY, E.J. *Optics of the atmosphere scattering by molecules and particles*. New York, John Wiley & Sons, 1976.
- NASA. GSFC. *Data users handbook*. Greenbelt, MD. 1976.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry*. Washington, D.C., 1970.
- REEVES, R.G., ed. *Introduction to eletromagnetic remote sensing with emphasis on applications to geology and hydrology*. Washington, AGI, c. 1968. AGI short course lecture notes.
- SILVA, L.F. Radiation and instrumentation in remote sensing. In: Purdue University. LARS. *Short course on remote sensing technology and application*. West Lafayette, IN, 1972.
- SIMON, I. *Infrared radiation*. New York, Van Nostrand Momentum, 1966.
- SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. *Remote sensing: the quantitative approach*. New York, McGraw-Hill, 1968.

TARANIK, J.V. *Characteristics of the LANDSAT multispectral data system.* Sioux Falls, 1978. (Open File Report 78-187).

TURNER, R.E. Atmospheric effects in remote sensing. In: SHAHROKHI, F. ed. *Remote sensing of Earth resources.* Tullahoma, TN, University of Tennessee, c 1973. V.2, p. 549-583. Technical paper select from Conference on Earth Resources Observation and Information Analysis System.