



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8984-PUD/62

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Elisabete Caria de Moraes

INPE
São José dos Campos
2002

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Elisabete Caria de Moraes¹
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE

¹ e.mail : bete@ltid.inpe.br

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	1-5
1. FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	1-7
1.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	1-7
1.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	1-9
1.3 ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA	1-12
1.4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE OBJETOS NATURAIS	1-15
1.5 SISTEMA SENSOR	1-18
1.6 NÍVEIS DE COLETAS DE DADOS	1-21
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1-22

LISTA DE FIGURAS

1 – COMPRIMENTOS DE ONDA	1-8
2 – O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	1-10
3 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA ENERGIA SOLAR NA ATMOSFERA	1-13
4 – TRANSMITÂNCIA ESPECTRAL DA ATMOSFERA	1-14
5 – INTERAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA COM O OBJETO	1-16
6 – NIVEIS DE COLETAS DE DADOS	1-21

1. FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos. Estas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos. A energia eletromagnética utilizada na obtenção dos dados por sensoriamento remoto é também denominada de radiação eletromagnética.

A quantidade e qualidade da energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres resulta das interações entre a energia eletromagnética e estes objetos. Essas interações são determinadas pelas propriedades físico-químicas e biológicas desses objetos e podem ser identificadas nas imagens e nos dados de sensores remotos. Portanto, a energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação, pois ela permite quantificar a energia espectral refletida e/ou emitida por estes, e assim avaliar suas principais características. Logo os sensores remotos são ferramentas indispensáveis para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais.

1.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

A energia eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero grau absoluto (0 Kelvin). Desta maneira, todo corpo com uma temperatura absoluta acima de zero pode ser considerado como uma fonte de energia eletromagnética.

O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre. A energia eletromagnética não precisa de um meio material para se propagar,

sendo definida como uma energia que se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz ($c = 300.000 \text{ Km/s}$, onde "c" é a velocidade da luz.).

A distância entre dois pontos semelhantes, como mostra a Figura 1, define o comprimento de onda e, o número de ondas que passa por um ponto do espaço num determinado intervalo de tempo, define a frequência da radiação eletromagnética.

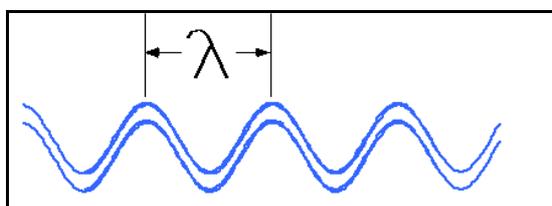


Fig. 1 – Comprimento de onda

Dado que a velocidade de propagação das ondas eletromagnética é diretamente proporcional à sua frequência e comprimento de onda, esta pode ser expressa por:

$$c = f \cdot \lambda \quad (1)$$

onde:

c = velocidade da luz (m/s)

f = frequência (ciclo/s ou Hz)

λ = comprimento de onda (m)

A quantidade de energia (Q) emitida, transferida ou recebida na forma de energia eletromagnética, está associada a cada comprimento de onda ou frequência e é definida por:

$$Q = h \cdot f = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

onde h é a constante de Planck ($6,625 \cdot 10^{-34}$ joule segundo (J.s)) e a unidade que quantifica esta energia é dada em Joule (J). Através desta equação verifica-se que quanto maior a quantidade de energia maior será a frequência ou menor será o comprimento de onda a ela associada e vice-versa.

Devido a ordem de grandeza destas variáveis é comum utilizar unidades submúltiplas do metro (micrometro: $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m, nanometro: $1 \text{nm} = 10^{-9}$ m) para comprimento de onda e múltiplas do Hertz (quilohertz: $1 \text{kHz} = 10^3$ Hz, megahertz: $1 \text{MHz} = 10^6$ Hz) para frequência.

1.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A energia eletromagnética pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência, sendo esta disposição denominada de espectro eletromagnético. Este apresenta subdivisões de acordo com as características de cada região. Cada subdivisão é função do tipo de processo físico que dá origem a energia eletromagnética, do tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto sobre o qual esta incide, e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética. O espectro eletromagnético se estende desde comprimentos de onda muito curtos associados aos raios cósmicos, até as ondas de rádio de baixa frequência e grandes comprimentos de onda, como mostra a Figura 2.

A medida que se avança para a direita do espectro eletromagnético as ondas apresentam maiores comprimentos de onda e menores frequências. A faixa espectral mais utilizada em sensoriamento remoto estende-se de $0,3 \mu\text{m}$ a $15 \mu\text{m}$, embora a faixa de microondas também é utilizada.

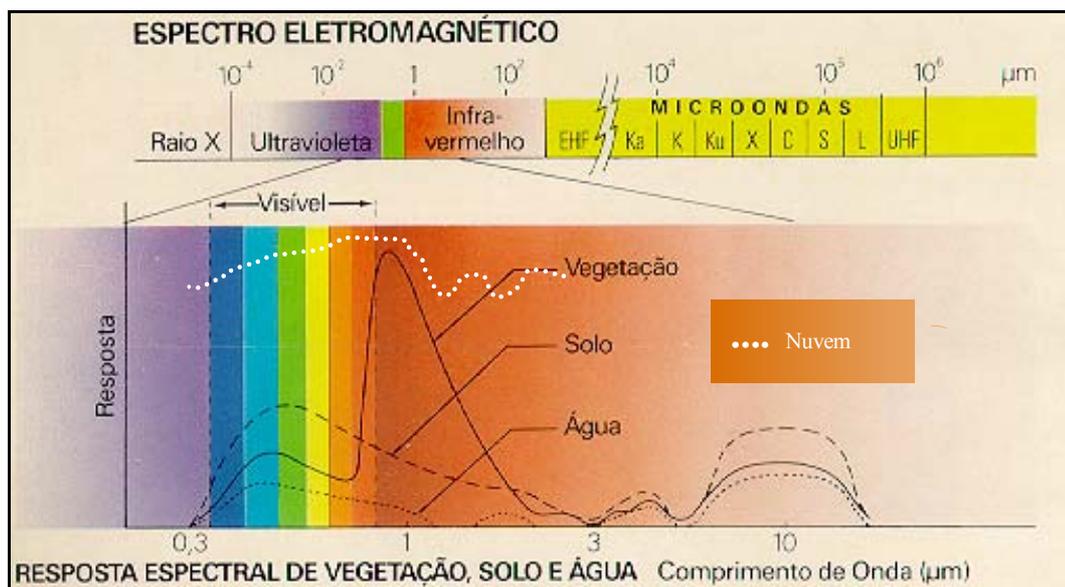


Fig. 2 - O espectro eletromagnético.

Podem-se observar na Figura 2 a existência das seguintes regiões:

Radiação Gama: é emitida por materiais radioativo e, por ser muito penetrante (alta energia), tem aplicações em medicina (radioterapia) e em processos industriais (radiografia industrial).

Raio X: é produzido através do freamento de elétrons de grande energia eletromagnética. Seu médio poder de penetração o torna adequado para uso médico (raio X) e industrial (técnicas de controle industrial).

Ultravioleta (UV): é produzida em grande quantidade pelo Sol, sendo emitida na faixa de 0,003 μm até aproximadamente 0,38 μm . Seu poder de penetração a torna nociva aos seres vivos, porém esta energia eletromagnética é praticamente toda absorvida pela camada de ozônio atmosférico.

Visível (LUZ): é o conjunto de radiações eletromagnéticas que podem ser detectadas pelo sistema visual humano. A sensação de cor que é produzida pela luz está associada a diferentes comprimentos de ondas. As cores estão associadas aos seguintes intervalos espectrais.

violeta: 0,38 a 0,45 μm

azul: 0,45 a 0,49 μm

verde: 0,49 a 0,58 μm

amarelo: 0,58 a 0,6 μm

laranja: 0,6 a 0,62 μm

vermelho: 0,62 a 0,70 μm

Infravermelho (IV): é a região do espectro que se estende de 0,7 a 1000 μm e costuma ser dividida em três sub-regiões:

IV próximo: 0,7 a 1,3 μm

IV médio: 1,3 a 6 μm

IV distante: 6 a 1000 μm

A energia eletromagnética no intervalo espectral correspondente ao infravermelho próximo é encontrada no fluxo solar ou mesmo em fontes convencionais de iluminação (lâmpadas incandescentes), enquanto as energias eletromagnéticas correspondentes ao intervalo espectral do infravermelho médio e distante (também denominadas de radiação termal) são provenientes da emissão eletromagnética de objetos terrestres.

Microondas: são radiações eletromagnéticas produzidas por sistemas eletrônicos (osciladores) e se estendem pela região do espectro de 1mm até cerca de 1m, o que corresponde ao intervalo de frequência de 300GHz a 300MHz. Os feixes de microondas são emitidos e detectados pelos sistemas de radar (*radio detection and ranging*).

Radio: é o conjunto de energias de frequência menor que 300MHz (comprimento de onda maior que 1m). Estas ondas são utilizadas principalmente em telecomunicações e radiodifusão.

Algumas regiões do espectro eletromagnético têm denominações que indicam alguma propriedade especial, como por exemplo:

Espectro óptico: refere-se à região do espectro eletromagnético que compreende as energias que podem ser coletadas por sistemas ópticos (ultravioleta, visível e infravermelho).

Espectro solar: refere-se à região espectral que compreende os tipos de energia emitidas pelo Sol. Cerca de 99% da energia solar que atinge a Terra encontra-se concentrada na faixa de 0,28 a 4 μm .

Espectro visível: refere-se ao conjunto das energias eletromagnéticas percebido pelo sistema visual humano, também denominado de luz.

Espectro termal: refere-se ao conjunto das energias eletromagnéticas emitidas pelos objetos terrestres e encontra-se nos intervalos espectrais correspondente ao infravermelho médio e distante.

Quando consideramos o Sol como fonte de energia eletromagnética (ou fonte de iluminação) os sensores detectam a energia refletida pelos objetos terrestres, portanto o sensoriamento remoto é realizado na faixa do espectro solar. Quando a Terra atua como fonte de energia eletromagnética os sensores detectam a energia emitida pelos corpos terrestres, portanto o sensoriamento remoto é realizado na faixa do espectro termal. Esta distinção torna possível o tratamento separado desses dois tipos de energia eletromagnética, facilitando a análise da energia radiante.

1.3 ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

A energia eletromagnética ao atravessar atmosfera terrestre pode ser absorvida, refletida e espalhada. Os gases presentes na atmosfera apresentam capacidade de absorção muito variáveis em relação ao comprimento de onda da energia solar incidente no sistema terra-atmosfera e da energia emitida pela superfície terrestre. Existem regiões do espectro eletromagnético para os quais

a atmosfera absorve muito da energia incidente no topo da atmosfera, às vezes não deixando chegar quase nada de energia na superfície terrestre. Esta interação da energia com a atmosfera pode ser comparada com uma cortina que age como um filtro e, dependendo de seu tecido, atenua ou até mesmo impede a passagem da luz. Neste caso os diferentes tipos de tecidos da cortina poderia ser comparado com os diferentes gases existentes na atmosfera terrestre, os quais atenuam a energia eletromagnética diferentemente.

A Figura 3 mostra a distribuição do espectro de energia eletromagnética do Sol no topo da atmosfera e na superfície terrestre observada ao nível do mar. As áreas sombreadas representam as absorções devido aos diversos gases presentes numa atmosfera limpa. Os principais gases absorvedores da radiação eletromagnética são vapor d'água (H_2O), oxigênio (O_2), ozônio (O_3) e gás carbônico (CO_2). Os gases CO , CH_4 , NO e N_2O ocorrem em pequenas quantidades e também exibem espectros de absorção.

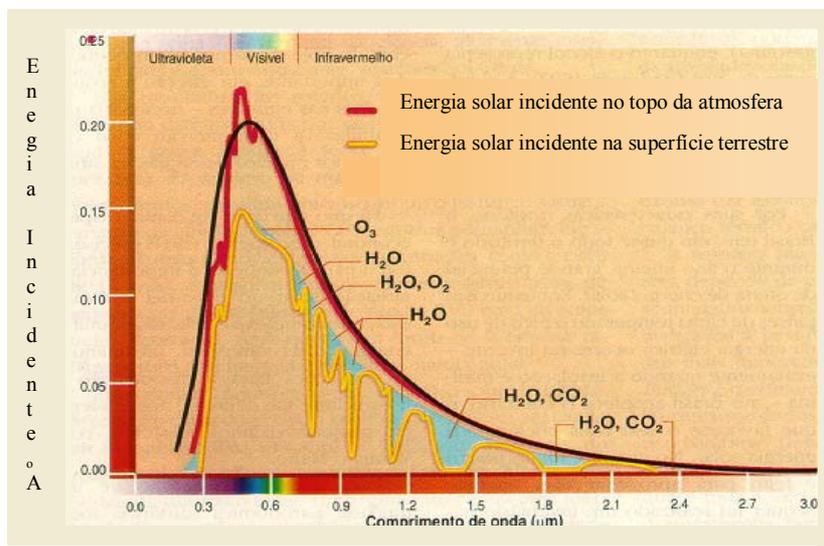


Fig. 3 - Curvas da distribuição espectral da energia solar na atmosfera/superfície terrestre.

Cerca de 70% da energia solar está concentrada na faixa espectral compreendida entre 0,3 e 0,7 μm e como a atmosfera absorve muito pouco nesta região, grande parte da energia solar atinge a superfície da Terra. Também existem regiões no espectro eletromagnético para os quais a atmosfera é opaca (absorve toda a energia eletromagnética). Na região do ultravioleta e visível, o principal gás absorvedor da energia eletromagnética solar é o ozônio (O_3), o qual protege a terra dos raios ultravioletas que são letais a vida vegetal e animal. Na região do infravermelho os principais gases absorvedores são o vapor d'água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2)

Existem regiões do espectro eletromagnético onde a atmosfera quase não afeta a energia eletromagnética, isto é, a atmosfera é transparente à energia eletromagnética proveniente do Sol ou da superfície terrestre. Estas regiões são conhecidas como janelas atmosféricas. Nestas regiões são colocados os detectores de energia eletromagnética, e portanto onde é realizado o sensoriamento remoto dos objetos terrestres. A Figura 4 apresenta as janelas atmosféricas e as regiões afetadas pelos principais gases atmosféricos.

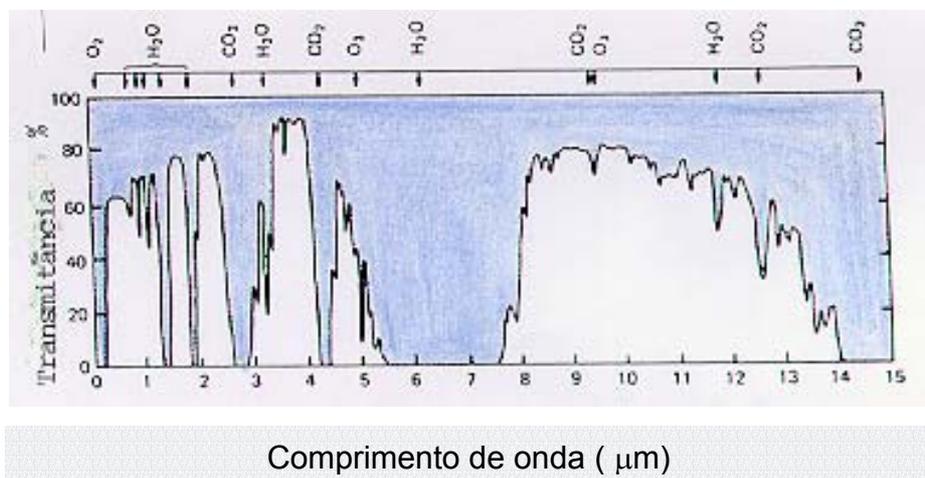


Fig. 4 – Transmissão espectral da atmosfera

A atmosfera quase não absorve a energia eletromagnética emitida pelos objetos que compõem a superfície terrestre, com exceção de uma pequena

banda de absorção do ozônio, centrada em $9,6 \mu\text{m}$. Nesta janela atmosférica o sistema terra-atmosfera perde energia para o espaço mantendo assim o equilíbrio térmico do planeta. Essas considerações são válidas para a atmosfera limpa, pois tanto nuvens como poluentes tendem a absorver a energia eletromagnética. As nuvens absorvem toda a energia na região do infravermelho, e emitem radiação eletromagnética proporcionalmente a sua temperatura. Acima de $14 \mu\text{m}$ a atmosfera é quase que totalmente opaca à energia eletromagnética, ou seja, absorve toda a energia eletromagnética com comprimentos de onda acima deste valor.

As interações da energia eletromagnética com os constituintes atmosféricos influenciam a caracterização da energia solar e terrestre disponíveis para o sensoriamento remoto de recursos naturais. A energia eletromagnética ao atingir a atmosfera é por esta espalhada, e parte desta energia espalhada retorna para o espaço, vindo a contaminar a energia refletida ou emitida pela superfície e que é detectada pelos sensores orbitais.

1.4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE OBJETOS NATURAIS

O fluxo de energia eletromagnética ao atingir um objeto (energia incidente) sofre interações com o material que o compõe, sendo parcialmente refletido, absorvido e transmitido pelo objeto, como pode ser visto na Figura 5.

A absorção, reflexão e transmissão da energia incidente poder ser total ou parcial, guardando sempre o princípio de conservação de energia. A capacidade de um objeto absorver, refletir e transmitir a radiação eletromagnética é denominada, respectivamente, de absorptância, reflectância e transmitância, sendo que os valores variam entre 0 e 1.

O comportamento espectral de um objeto pode ser definido como sendo o conjunto dos valores sucessivos da reflectância do objeto ao longo do espectro eletromagnético, também conhecido como a assinatura espectral do objeto. A

assinatura espectral do objeto define as feições deste, sendo que a forma, a intensidade e a localização de cada banda de absorção é que caracteriza o objeto.

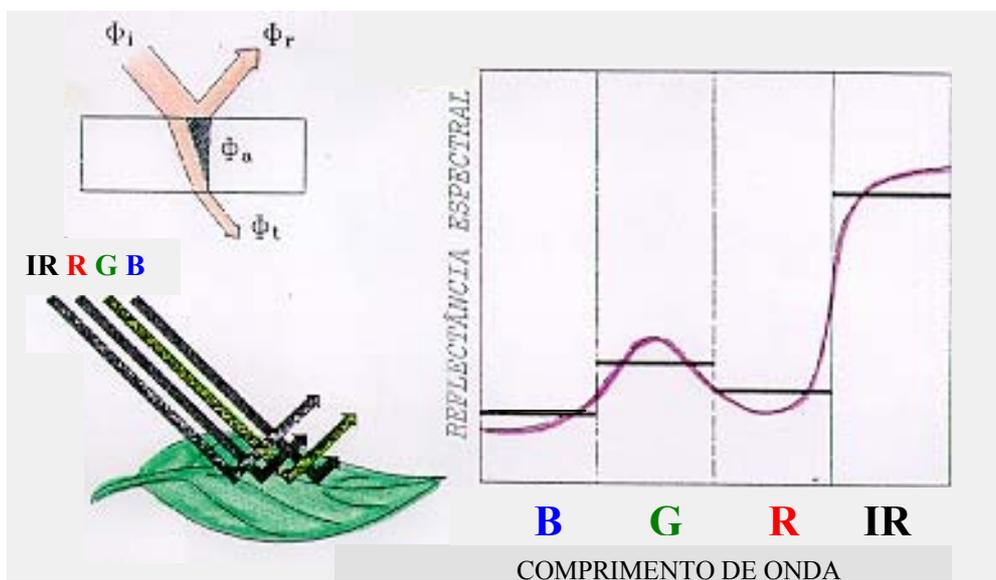


Fig. 5 - Interação da energia eletromagnética com o objeto.

Os objetos interagem de maneira diferenciada espectralmente com a energia eletromagnética incidente, pois os objetos apresentam diferentes propriedades físico-químicas e biológicas. Estas diferentes interações é que possibilitam a distinção e o reconhecimento dos diversos objetos terrestres sensoriados remotamente, pois são reconhecidos devido a variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda. A Figura 2 apresenta os espectros de reflectância de alguns objetos bastante freqüentes nas imagens de sensoriamento remoto como, água, solo, areia, vegetação e nuvens.

O conhecimento do comportamento espectral dos objetos terrestres é muito importante para a escolha da região do espectro sobre a qual pretende-se adquirir dados para determinada aplicação. As características básicas observadas no comportamento espectral destes objetos são:

- A *vegetação sadia* apresenta alta absorção da energia eletromagnética na região do espectro visível, que é capturada pela clorofila para a realização da fotossíntese. Dentro do espectro visível a absorção é mais fraca na região que caracteriza a coloração da vegetação. A alta reflectância no infravermelho próximo (até $1,3\mu\text{m}$) é devido a estrutura celular, sendo que a partir deste comprimento de onda é o conteúdo de água na vegetação quem modula as bandas de absorção presentes no comportamento espectral desta.
- O comportamento espectral de *rochas* é resultante dos espectros individuais dos minerais que as compõem. Os minerais apresentam características decorrentes de suas bandas de absorção. Portanto a absorção é o principal fator que controla o comportamento espectral das rochas.
- O comportamento espectral dos *solos* é também dominado pelas bandas de absorção de seus constituintes. As combinações e arranjos dos materiais constituintes dos solos é que define o seu comportamento espectral, sendo que os principais fatores são a constituição mineral, a matéria orgânica, a umidade e a granulometria (textura e estrutura) deste.
- A água pode-se apresentar na natureza em três estados físicos, os quais apresentam comportamento espectral totalmente distintos. O comportamento espectral da *água líquida pura* apresenta baixa reflectância (menor do que 10%) na faixa compreendida entre $0,38$ e $0,7\mu\text{m}$ e máxima absorção acima de $0,7\mu\text{m}$. O comportamento espectral de *corpos d'água* é modulado principalmente pelos processos de absorção e espalhamento produzidos por materiais dissolvidos e em suspensão neles, pois é verificado que a presença de matéria orgânica dissolvida em corpos d'água desloca o máximo de reflectância espectral para o verde-amarelo, enquanto que a presença de matéria inorgânica em suspensão resulta num deslocamento em direção ao vermelho.

- O comportamento espectral de *nuvens* apresenta elevada reflectância (em torno de 70%), em todo o espectro óptico com destacadas bandas de absorção em 1, 1,3 e 2 μ m.

Com o intuito de melhor interpretar as imagens de satélites, muitos pesquisadores têm se dedicado a pesquisa fundamental, ou seja, a obtenção e a análise de medidas da reflectância dos objetos terrestres em experimento de campo e de laboratório, os quais possibilitam uma melhor compreensão das relações existentes entre o comportamento espectral dos objetos e as suas propriedades.

1.5 SISTEMA SENSOR

Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética (em determinadas faixas do espectro eletromagnético) proveniente de um objeto, transformá-las em um sinal elétrico e registrá-las, de tal forma que este possa ser armazenado ou transmitido em tempo real para posteriormente ser convertido em informações que descrevem as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre. As variações de energia eletromagnética da área observada podem ser coletadas por sistemas sensores imageadores ou não-imageadores.

Os sistemas imageadores fornecem como produto uma imagem da área observada, como por exemplo temos os “*scanners*” e as câmaras fotográficas, enquanto que os sistemas não-imageadores, também denominados radiômetros ou espectroradiômetros, apresentam o resultado em forma de dígitos ou gráficos.

Os sistemas sensores também podem ser classificados como ativos e passivos. Os sensores passivos não possuem fonte própria de energia eletromagnética, como por exemplo os sensores do satélite *Landsat 5*, os radiômetros e espectroradiômetros. Os sensores ativos possuem uma fonte

própria de energia eletromagnética. Eles emitem energia eletromagnética para os objetos terrestres a serem imageados e detectam parte desta energia que é refletida por estes na direção destes sensores. Como exemplo podemos citar o radar e qualquer câmara fotográfica com *flash*. Os sistemas fotográficos foram os primeiros equipamentos a serem desenvolvidos e utilizados para o sensoriamento remoto de objetos terrestres

As principais partes de um sensor são:

a) *coletor*: é um componente óptico capaz de concentrar o fluxo de energia proveniente da amostra no detector;

b) *filtro*: é o componente responsável pela seleção da faixa espectral da energia a ser medida;

c) *detetor*: é um componente de pequenas dimensões feito de um material cujas propriedades elétricas variam ao absorver o fluxo de energia, produzindo um sinal elétrico.

d) *processador*: é um componente responsável pela amplificação do fraco sinal gerado pelo detetor e pela digitalização do sinal elétrico produzido pelo detector; e

e) *unidade de saída*: é um componente capaz de registrar os sinais elétricos captados pelo detector para posterior extração de informações.

A qualidade de um sensor geralmente é especificada pela sua capacidade de obter medidas detalhadas da energia eletromagnética. As características dos sensores estão relacionadas com a resolução espacial, espectral e radiométrica.

A *resolução espacial* representa a capacidade do sensor distinguir objetos. Ela indica o tamanho do menor elemento da superfície individualizado pelo sensor. A resolução espacial depende principalmente do detector, da altura do

posicionamento do sensor em relação ao objeto. Para um dado nível de posicionamento do sensor, quanto menor for a resolução geométrica deste maior será o grau de distinção entre objetos próximos. Por exemplo, o sistema sensor do *Thematic Mapper (TM)* do *Landsat 5* possui uma resolução espacial de 30 metros.

A *resolução* espectral refere-se à largura espectral em que opera o sensor. Portanto, ela define o intervalo espectral no qual são realizadas as medidas, e conseqüentemente a composição espectral do fluxo de energia que atinge o detector. Quanto maior for o número de medidas num determinado intervalo de comprimento de onda melhor será a resolução espectral da coleta. Por exemplo, o *Landsat 5* possui os sensores TM e *Multispectral Scanning System (MSS)*. O sensor TM apresenta algumas bandas espectrais mais estreitas do que o sensor MSS, portanto nestas bandas o TM apresenta melhor resolução espectral do que o MSS.

A *resolução radiométrica* define a eficiência do sistema em detectar pequenos sinais, ou seja, refere-se à maior ou menor capacidade do sistema sensor em detectar e registrar diferenças na energia refletida e/ou emitida pelos elementos que compõe a cena (rochas, solos, vegetações, águas, etc). Por exemplo, o sistema sensor TM do *Landsat 5* distingue até 256 tons distintos de sinais representando-os em 256 níveis de cinza.

Uma outra qualidade importante é a resolução temporal do sensor, que está relacionada com a repetitividade com que o sistema sensor pode adquirir informações referentes ao objeto. Por exemplo, os sensores do *Landsat 5* possuem uma repetitividade de 16 dias.

Para melhor interpretar os sinais coletados faz-se necessário o conhecimento das condições experimentais como: fonte de radiação, efeitos atmosféricos, características do sensor, geometria de aquisição de dados, tipo de processamento e estado do objeto.

1.6 NÍVEIS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os sistemas sensores podem ser mantidos no nível orbital (satélites) ou suborbital (acoplados em aeronaves ou mantidos ao nível do solo), como pode ser visualizado na Figura 6.

Ao nível do solo é realizada a aquisição de dados em campo ou em laboratório onde as medidas são obtidas utilizando-se radiômetros ou espectrorradiômetros.

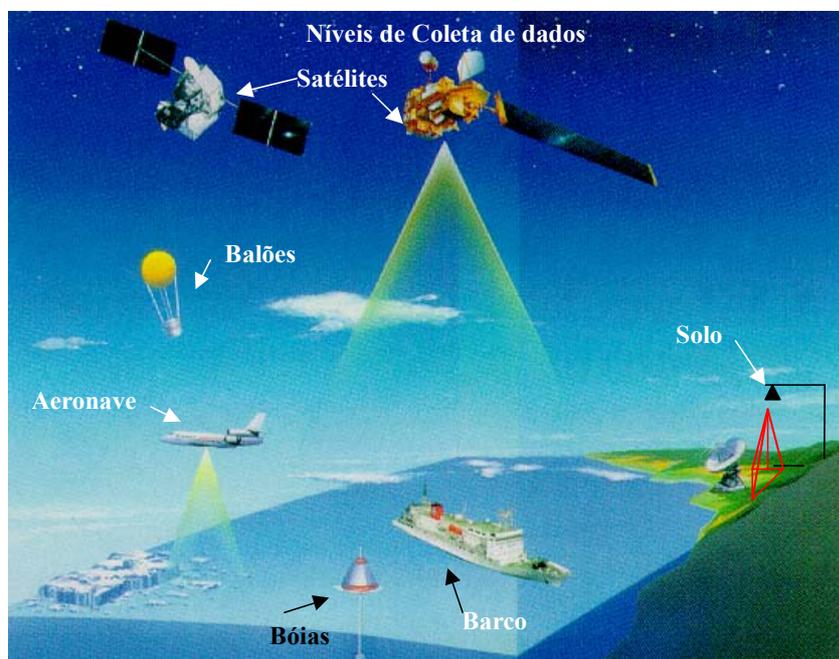


Fig. 6 – Níveis de Coleta de Dados

Fonte : Moreira (2001)

Ao nível de aeronaves os dados de sensoriamento remoto podem ser adquiridos por sistemas sensores de varredura óptico-eletrônico, sistemas fotográficos ou radar, e a resolução espacial destes dados dependerá da altura do vôo no momento do aerolevanteamento.

A obtenção de dados no nível orbital é realizada através de sistemas sensores a bordo de satélites artificiais. O sensoriamento remoto neste nível permite a repetitividade das informações, bem como um melhor monitoramento dos recursos naturais para grandes áreas da superfície terrestre.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Moreira, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. São José dos Campos, 2001. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 208p.

Novo, E. M. L. M. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. São Paulo. ed. : Edgard Blücher, 1989, 308p.

Steffen, A. C., Moraes, E. C. *Introdução à radiometria*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, VII. Curitiba, 10-14. Maio, 1993. Tutorial São José dos Campos. INPE, 1993. 7p.

Steffen, A. C., Moraes, E. C., Gama, F. F. *Radiometria óptica espectral*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, VIII. Salvador, 14-19. Abr., 1996. Tutorial São José dos Campos. INPE, 1996. 43p.