

**MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPECIAIS**

**INPE 5619-PUD/065**

**COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO**

**Flávio Jorge Ponzoni  
Atílio Antonio Disperati(1)**

**(1) Escola Superior de Florestas  
Universidade Federal do Paraná**

**INPE  
São José dos Campos  
Fevereiro de 1995**

## RESUMO

São apresentados os aspectos principais relacionados à natureza da radiação eletromagnética e à sua interação com a vegetação, incluindo discussões sobre os parâmetros geométricos dessa interação. A vegetação é tratada aqui ora como uma folha isolada, ora como um dossel constituído por plantas. Ao final são apresentados alguns comentários sobre os modelos de reflectância da vegetação.

## **SPECTRAL PROPERTIES OF VEGETATION**

### **ABSCTRACT**

The main aspects related with the eletromagnetic radiation and with its interaction with vegetation are presented, including the geometric parameters of that interaction. The term vegetation is considered here either for a leaf or far a canopy. Remarks about canopy reflectance models are also presented.

## SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	iv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 A NATUREZA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	1
2.1 - Propriedades fundamentais.....	2
2.2 - Principais fontes de REM e o espectro eletromagnético.....	4
2.3 - Medidas radiométricas.....	6
2.3.1 - Medidas angulares.....	7
2.3.2 - Quantidades espectrais.....	9
3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS.....	12
3.1 - Considerações gerais.....	12
3.2 - Geometria de aquisição de dados.....	13
3.3 - Parâmetros atmosféricos.....	14
4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO.....	15
4.1 - Folhas.....	16
4.1.1 - Região do visível.....	18
4.1.2 - Região do infravermelho próximo.....	20
4.1.3 - Região do infravermelho médio.....	20
4.1.4 - Teorias que tentam explicar a reflectância espectral de folhas.....	21
4.1.4.1 - Reflectância das faces dorsal e ventral.....	22
4.1.4.2 - Presença de água.....	23
4.1.4.3 - Maturação da folha.....	23
4.1.4.4 - Modelo de reflectância.....	23
4.1.4.5 - Efeito do estresse.....	26
4.2 - Interações da REM com a vegetação.....	26
4.2.1 - Modelos de reflectância da vegetação.....	26
4.2.2 - Bases conceituais para o entendimento da reflectância da vegetação.....	29
4.2.3 - O modelo de reflectância da vegetação proposto por Suits.....	32
4.2.3.1 - Descrição do modelo.....	33
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 - Flutuações dos campos elétrico e magnético.....	2
2 - Intensidade de energia solar no topo da atmosfera, na superfície terrestre e de um corpo negro a 6000 K.....	4
3 - Espectros de emissão da Terra e do Sol.....	5
4 - O espectro eletromagnético e suas principais fontes de radiação, tipos de interações e detetores.....	5
5 - Conceito de densidade de fluxo radiante.....	7
6 - Conceito de ângulo sólido.....	8
7 - Intensidade radiante de uma fonte pontual.....	8
8 - Conceito de radiância.....	9
9 - Representação gráfica dos possíveis ângulos de incidência sobre um alvo.....	11
10 - Curvas de reflectância espectral bidirecional do trigo, construídas a partir de medidas tomadas em diferentes condições experimentais.....	12
11 - Geometria de aquisição de dados.....	13
12 - Efeito da visibilidade sobre a reflectância aparente de três diferentes superfícies.....	15
13 - Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente.....	17
14 - Curva de reflectância típica de uma folha verde.....	18
15 - Espectro de absorção de alguns pigmentos.....	18
16 - Curva de reflectância de folhas de <i>Coleus</i> sp.....	19
17 - Curva de reflectância de folhas de <i>Coleus</i> sp.....	20
18 - Influência do grau de umidade na reflectância de folhas de milho.....	21
19 - Esquema das possíveis trajetórias da REM dentro de uma folha.....	22
20 - Reflectância espectral das faces ventral e dorsal de folhas de <i>Syringa vulgaris</i> .....	22
21 - Esquema do sistema completo de sensoriamento remoto.....	27
22 - Representação esquemática do "problema direto", "problema inverso" e a estimativa dos parâmetros do dossel a partir de dados de reflectância.....	28
23 - A geometria do dossel e sua influência sobre a observação da FDRB.....	32
24 - As projeções horizontal e vertical de uma folha usadas no modelo Suits.....	33
25 - Esquema representativo de um modelo considerando três camadas.....	34

## 1 INTRODUÇÃO

A extração de informações e a otimização da utilização de dados coletados através de sensores remotos só são plenamente atingidos através do conhecimento do comportamento espectral dos objetos existentes na superfície terrestre e dos fatores que interferem nesse comportamento. Neste contexto encontram-se a definição das características de sensores, a definição do tipo de processamento a que devem ser submetidos os dados e a definição da forma de aquisição de dados (geometria de coleta, frequência, altura ou distância de coleta, resoluções espacial e espectral, etc).

A década de 1970 foi marcada pela disponibilidade de dados orbitais coletados pelo sensor MSS (Multispectral Scanner System), colocado a bordo dos satélites da série Landsat. Estudos conduzidos em todo o mundo constataram a viabilidade de sua utilização no estudo dos recursos naturais, bem como apontaram para a necessidade de aprimoramentos sobretudo no que se referia a resolução espacial. Em decorrência disto, nos anos 80, surgiu o sensor TM (Thematic Mapper), também colocado a bordo dos satélites Landsat, cuja principal diferença em relação ao seu antecessor MSS se verificou na resolução espacial que foi definida para 30 m no terreno, contra os 80 m do MSS. Ainda na mesma época foi colocado em órbita terrestre, a bordo dos satélites SPOT, o sensor HRV com avanços também na resolução espacial, agora para 10 m no chamado modo pancromático e 20 m no modo multiespectral.

Todos estes aprimoramentos foram direcionados para o atendimento de exigências de ordem cartográfica. Evidentemente houveram avanços também no campo espectral já que, em relação ao sensor MSS, o sensor TM permite a coleta de dados em mais bandas espectrais.

No Brasil, o uso destes dados tem sido conduzido, com maior ênfase, em trabalhos de mapeamento e monitoramento dos recursos naturais, valendo-se para isso de técnicas de análise visual de imagens, bem como de seu processamento digital; este último incluindo a utilização de equipamentos e programas desenvolvidos em território nacional. Contudo muito pouco tem sido feito no estudo do comportamento espectral de alvos visando as conseqüentes otimizações mencionadas.

Na década de 90 as atenções dos pesquisadores de todo o mundo voltar-se-ão para o monitoramento global da geosfera e da biosfera. Para tanto foi elaborado o chamado Programa EOS (Earth Observing System), nos Estados Unidos, que visa o lançamento em órbita terrestre de 16 novos tipos de sensores com diversas resoluções espectrais e radiométricas. Os interesses por resoluções espaciais ditas finas serão atendidos pelos sensores já existentes como o MSS, TM e HRV; contudo, esperam-se grandes avanços agora no campo espectral. Neste âmbito, o conhecimento do comportamento espectral de alvos e dos fatores que o influenciam assume importância ainda maior, uma vez que estarão à disposição novos tipos de dados, cuja interpretação exigirá tais conhecimentos.

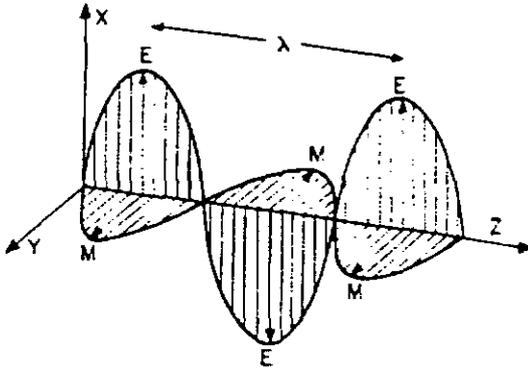
Este trabalho tem como objetivos básicos: 1) apresentar alguns conceitos radiométricos básicos e importantes na caracterização espectral de alvos; 2) apresentar alguns aspectos do comportamento espectral da vegetação e da modelagem matemática freqüentemente proposta para seu estudo.

## 2 A NATUREZA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Considera-se que o elemento fundamental no qual baseiam-se as técnicas de sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética (REM). E através dela que a energia se propaga a partir de uma fonte, diretamente através do espaço, ou indiretamente pela sua reflexão quando incidente nas mais variadas superfícies. Sobre a interação desta energia com a matéria constituinte dos objetos é que se fundamenta o sensoriamento remoto.

## 2.1-PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS

Após estudos efetuados por inúmeros pesquisadores, um físico inglês chamado James Clerk Maxwell, elaborou uma formulação matemática para os fenômenos elétrico e magnético com a qual aparentemente explicou não só os resultados experimentais alcançados por anteriores pesquisadores, como também unificou teorias e forneceu as bases lógicas de predição da possível existência da forma dinâmica desses fenômenos; em outras palavras, Maxwell explicou a REM sob a forma de ondas que se movimentam. O referido pesquisador considerou a REM numa escala macroscópica e a sua interação com a matéria dependente das propriedades elétricas e magnéticas dessa mesma matéria. Sua formulação não impôs limitações nas possíveis frequências, comprimentos de onda ou amplitudes nas quais a radiação poderia ocorrer. De acordo com essa formulação, a aceleração de uma carga elétrica provoca perturbações nos campos elétrico e magnético, que se propagam repetidamente no vácuo. Estas perturbações são chamadas de ondas eletromagnéticas, que podem então ser definidas como a oscilação de ambos os campos mencionados segundo um padrão harmônico. Por padrão harmônico entende-se que as ondas são espaçadas repetidamente no tempo. A Figura 1 representa esquematicamente as flutuações dos campos elétrico (E) e magnético (M) de uma onda propagando-se numa dada direção Z. Os eixos XY definem o plano ortogonal à direção Z no qual estes campos interagem.



E= Campo Elétrico;  
M= Campo Magnético;  
XZ= Plano de excitação do campo elétrico;  
YZ= Plano de excitação do campo magnético;  
Z= Direção de propagação da onda eletromagnética;  
 $\lambda$ = Comprimento de onda;

Fig. 1-Flutuações dos campos elétrico e magnético de uma onda.

FONTE: Novo(1989)

Como pode ser observado na Figura 1, os campos E e M são perpendiculares entre si e ambos oscilam perpendicularmente em relação à direção de propagação da onda.

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo é de  $3 \times 10^8$  m/s. O número de ondas que passa por um determinado ponto no espaço, num determinado tempo, define a frequência (f). A frequência é diretamente proporcional à velocidade de propagação da radiação, contudo, como essa velocidade é constante para um mesmo meio de propagação, para que haja alteração na frequência, é necessário que haja alteração no comprimento de onda ( $\lambda$ ), ou seja, na distância compreendida entre os pontos máximos das ondas (crista-vide Figura 1). Assim, a relação entre estes três parâmetros mencionados pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

onde:  $c$ =velocidade da luz ;  
 $f$ =freqüência;  
 $\lambda$ =comprimento de onda.

Quando a onda se propaga através da matéria, a velocidade de propagação depende das propriedades do material e da freqüência da onda. A relação entre a velocidade de propagação ( $v$ ), o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a freqüência ( $f$ ) é expressa por:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2)$$

Como a freqüência não se altera quando as ondas penetram na matéria, o comprimento de onda deve se alterar com a alteração da velocidade de propagação. Por exemplo, a luz visível se propaga através do vidro com uma velocidade de aproximadamente  $c/1,5$ . Assim o comprimento de onda dessa radiação no interior do vidro é 1,5 vezes mais curto do que no espaço livre. Este fator 1,5 é denominado Índice de refração, sendo que cada objeto possui seu próprio Índice de refração.

Quando uma onda eletromagnética atinge um objeto, ocorre um processo de transferência de energia da radiação para o objeto. Para explicar esse processo de transferência, outro físico inglês chamado Planck chegou a formulação que a energia radiante transfere-se de um corpo para outro em quantidades fixas. Um corpo não irradia energia de uma forma contínua, mas por meio de pulsos ou quanta. Essa energia irradiada deve satisfazer a expressão:

$$Q = h \cdot f \quad (3)$$

onde:  $Q$ =energia;  
 $h$ =constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  watts);  
 $f$ =freqüência.

Da substituição da variável  $f$ , da equação 3 para a equação 1, resulta:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{Q} \quad (4)$$

Através desta equação pode-se concluir que um quantum de energia é diretamente proporcional à freqüência e inversamente proporcional ao comprimento de onda. Das observações anteriores pode-se concluir que um certo feixe de radiação, atingindo um objeto, terá um espectro de comprimentos de onda com certas "quantidades" diferentes de energia. Adicionalmente, a REM em cada comprimento de onda terá uma certa probabilidade de ser absorvida pela matéria em função de suas propriedades físico-químicas.

A matéria é composta por átomos que se organizam em moléculas segundo arranjos bem definidos. Os átomos, por sua vez, são formados por um núcleo e por elétrons que orbitam ao redor deste núcleo. Os elétrons ocupam órbitas bem definidas que possuem diferentes níveis de energia. Quando um átomo é atingido por um feixe de REM com uma certa quantidade de energia, esta poderá ser absorvida pela matéria se aquela for suficiente para provocar um salto energético de um elétron. O elétron que estava no estado denominado fundamental, passa para um estado excitado. Ele sofre uma transição de um estado para outro absorvendo radiação. Esse quantum de radiação absorvido é novamente emitido quando o elétron volta a seu estado fundamental. A esse quantum de energia absorvida ou emitida dá-se o nome de fóton. O termo fóton enfatiza as propriedades corpusculares da REM. A magnitude do quantum depende unicamente da freqüência da radiação. O fóton emitido por um corpo oscila com uma dada freqüência. Desta maneira surge um impasse que leva a admitir que a energia radiante se comporta como uma onda eletromagnética e como partícula. Certos fenômenos como a

propagação da energia, a dispersão, a reflexão, a refração, a interferência, etc, são melhor explicados quando essa energia radiante é tratada como uma onda. Outros fenômenos, como a absorção e a emissão de energia, são melhor compreendidos quando é reconhecida a natureza quântica do campo eletromagnético.

## 2.2-PRINCIPAIS FONTES DE REM E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A principal fonte de REM considerada para o emprego de técnicas de sensoriamento remoto é o Sol, que pode ser considerado como uma esfera de gás aquecido pelas reações nucleares de seu interior. A superfície aparente do Sol é conhecida como fotosfera que irradia energia para todo o sistema solar. A esta energia radiante dá-se o nome de Fluxo Radiante. A configuração deste fluxo em termos dos comprimentos de onda encontrados (termos espectrais) é bastante complexa devido às grandes variações de temperatura que ocorrem na Fotosfera e pela opacidade de certas regiões da atmosfera terrestre.

A Figura 2 mostra um gráfico no qual encontram-se plotadas as distribuições das intensidades do Fluxo Radiante solar no topo da atmosfera, na superfície terrestre e de um corpo negro a 6000 K, segundo uma dada amplitude de comprimentos de onda.

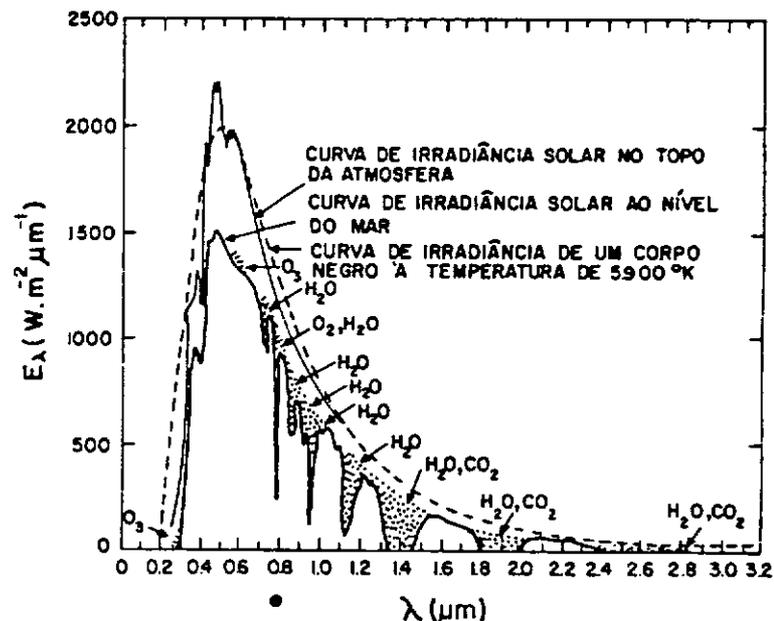


Fig.2-Intensidade de energia solar no topo da atmosfera na superfície terrestre e de um corpo negro a 6000 K.

FONTE: Swain e Davis (1978)

A análise deste gráfico permite algumas considerações sobre a energia solar disponível na superfície terrestre. Pode-se observar que o máximo de energia disponível, ou as maiores intensidades de radiação, encontra-se na faixa compreendida entre 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ , que é denominada de região visível do espectro eletromagnético. Essa região é assim denominada porque corresponde à região em que o olho do ser humano é sensível. Outro fato importante a ser observado é que existem regiões do espectro eletromagnético para as quais a atmosfera é opaca, ou seja, não permite a passagem da REM. Estas regiões são denominadas bandas de absorção da atmosfera. As demais regiões em que a atmosfera é transparente, ou seja, permite a passagem da REM provinda do Sol, são conhecidas como "janelas" atmosféricas. Os componentes atmosféricos interferem na qualidade e na quantidade de energia solar que atinge os objetos da superfície terrestre. Em face desta limitação, outras fontes de REM são utilizadas. A própria Terra

é considerada como uma fonte de REM. A distribuição espectral de REM da Terra aproxima-se à distribuição da radiação de um corpo negro a temperatura de 300 K, as quais encontram-se graficamente representadas na Figura 3. O conceito de Excitância, termo apresentado nesta Figura 3, será apresentado na seção 2.3 (Medidas Radiométricas).

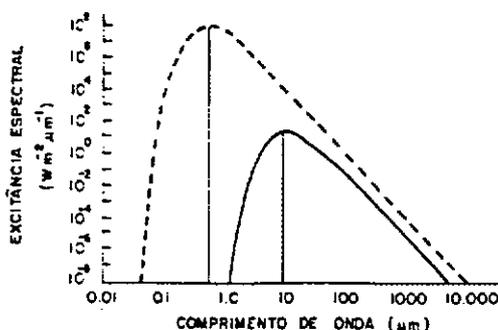


Fig. 3-Espectros de emissão da Terra e do Sol.

FONTE: Novo(1989)

Pode-se verificar que há diferenças substanciais entre ambas as distribuições quanto à intensidade total (máxima) e à região espectral de máxima intensidade. Pela comparação destas distribuições pode-se concluir que quanto maior a temperatura de um corpo, maior a quantidade de energia por ele emitida e menor o comprimento de onda de máxima emissão.

As fontes de REM caracterizam-se por seu espectro de emissão ao longo do espectro eletromagnético. A Figura 4 representa o espectro eletromagnético para as radiações conhecidas.

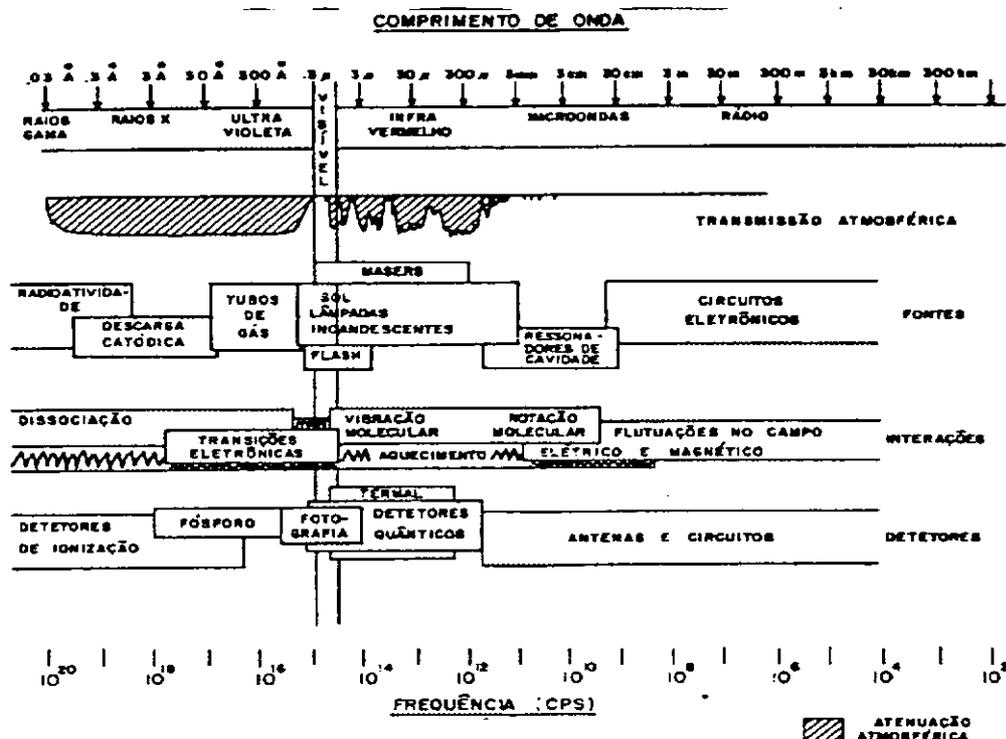


Fig. 4-O espectro eletromagnético e suas principais fontes de radiação, tipos de interações e detetores.

FONTE: Novo(1989)

## 2.3-MEDIDAS RADIOMÉTRICAS

O sensoriamento remoto fundamenta-se na detecção das alterações sofridas pela REM quando esta interage com os componentes da superfície terrestre. Para se avaliar o tipo de interação da REM com um dado objeto, há a necessidade da realização de medidas que informem sobre a quantidade de energia irradiada pela fonte, a quantidade de energia atenuada pelo meio que se interpõe entre a fonte e o tal objeto, e a quantidade de energia absorvida pelo objeto. Além destes aspectos quantitativos, há também o interesse de se conhecer quais regiões do espectro de radiação da fonte que sofreram maior atenuação por parte do meio antes de incidir sobre o objeto, e em que regiões desse espectro houve maior ou menor absorção. Estas informações são conseguidas através das medidas radiométricas e podem ser representadas por unidades fotométricas ou unidades radiométricas. As primeiras são normalmente usadas para medir a chamada "luz", uma vez que estão fundamentadas na pressuposição de que o olho humano é um sensor de radiação, e por conseguinte a sua sensibilidade é a base da formulação destas unidades. Em sensoriamento remoto são utilizadas mais comumente as unidades radiométricas, as quais encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Os símbolos apresentados na primeira coluna da Tabela 1 são os mais comumente usados, apesar de outros símbolos mais antigos ainda serem encontrados na literatura específica.

Tabela 1-Unidades radiométricas (Swain e Davis,1978).

Símbolo	Descrição	Expressão	Unidade	Abreviatura
Q	Energia Radiante		Joule	J
$\phi$	Fluxo Radiante	$\delta Q/\delta t$	Watts	W
M	Excitância	$\delta\phi/\delta A$	Watts/m <sup>2</sup>	W/m
E	Irradiância	$\delta\phi/\delta A$	Watts/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
L	Radiância	$\delta^2\phi/\cos\theta\delta A\delta\omega$	Watts/m <sup>2</sup> /sr	W/m <sup>2</sup> sr
M <sub><math>\lambda</math></sub>	Excitância espectral	$\delta M/\delta\lambda$	Watts/m <sup>2</sup> /μm	W/m <sup>2</sup> μm
E <sub><math>\lambda</math></sub>	Irradiância espectral	$\delta E/\delta\lambda$	Watts/m <sup>2</sup> /μm	W/m <sup>2</sup> μm
L <sub><math>\lambda</math></sub>	Radiância espectral	$\delta L/\delta\lambda$	Watt/m <sup>2</sup> sr μm	W/m <sup>2</sup> sr μm

A Energia Radiante é uma medida que indica a capacidade da radiação realizar um trabalho físico, tal como mover objetos, esquentar objetos ou causar alguma alteração no estado da matéria. A Energia radiante causa no elemento detetor de um sensor mudanças físicas específicas as quais podem ser quantificadas.

O conceito de Densidade de Fluxo Radiante surge quando um Fluxo Radiante é interceptado por uma superfície plana. É freqüente a necessidade de se conhecer a quantidade deste fluxo que é interceptada por unidade de área dessa superfície. O Fluxo Radiante interceptado, dividido pela área da superfície em questão, representa a Densidade de Fluxo Radiante. Cada pequena fração da superfície plana pode ser visualizada como interceptando uma fração do fluxo igualmente pequena; a densidade de fluxo em cada uma destas frações da superfície plana é a quantidade de fluxo interceptada pela fração da superfície, dividida pela área dessa fração. Quando estas frações são tomadas infinitesimalmente pequenas, esta razão pode ser considerada como a densidade de fluxo sobre cada ponto da superfície plana.

A densidade de Fluxo Radiante, no caso de um fluxo incidente sobre uma superfície plana, é chamada Irradiância, e é representada pelo símbolo E e expressa em Watt/m<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>). É importante notar que a direção do fluxo não foi especificada até o momento; ou seja, não foi considerada até agora a direção da qual procede o fluxo dentro da hemisfera sobre a superfície plana. A Figura 5 ilustra o conceito de densidade de fluxo radiante.

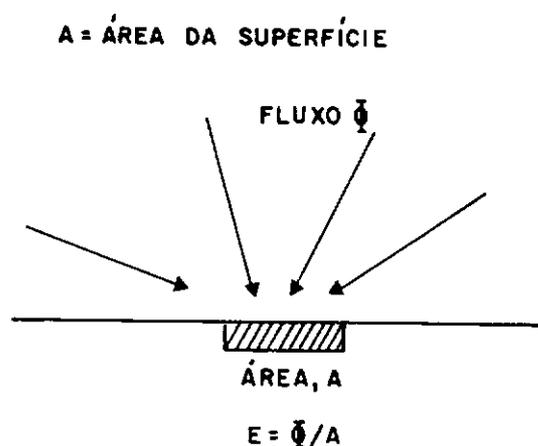


Fig. 5- Conceito de densidade de fluxo radiante.

FONTE: Suits (1983)

A Irradiância sobre uma superfície pode ser diferente de um ponto para outro ponto dessa superfície. Se ela for constante, então o fluxo interceptado é dado por:

$$\phi = E \cdot A \quad (5)$$

onde: A=área da superfície.

Enquanto a Irradiância refere-se à densidade de fluxo radiante que chega até uma superfície, essa mesma densidade de fluxo que deixa uma dada superfície é chamada Exitância, a qual é representada pelo símbolo M e é expressa nas mesmas unidades da Irradiância ( $W/m^2$ ). Aqui também a direção tomada pelo fluxo ao deixar um dado ponto da superfície não é especificada. Contudo, em sensoriamento remoto, essa direção é de fundamental importância, uma vez que na maioria dos casos sempre existirá uma fonte de radiação localizada espacialmente que emitirá radiação numa dada direção, da mesma forma que haverá um dispositivo (sensor) também localizado espacialmente que será o responsável pela coleta e quantificação do fluxo interceptado. Assim surge a necessidade do conceito de medidas angulares.

### 2.3.1-MEDIDAS ANGULARES

São dois os sistemas de medidas angulares tradicionalmente usados: graus e radianos. Um grau é um ângulo subtendido por um arco de um círculo tendo 1/360 de circunferência. O radiano é um ângulo subtendido por um arco de um círculo que tem seu perímetro igual a seu raio. O ângulo subtendido por um arco de comprimento L, num círculo de raio r é dado por L/r radianos.

O conceito de ângulo sólido é outro conceito importante para as duas medidas quantitativas de fluxo radiante (E e M). O sistema de medida angular mais comumente usado na literatura é o radiano. A Figura 6 ilustra o conceito de ângulo sólido.

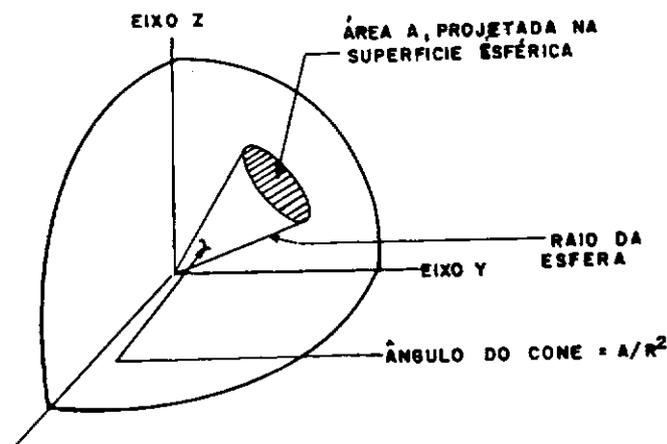


Fig. 6-Conceito de ângulo sólido.

FONTE: Suits(1983)

O ângulo de um cone formado por uma parte de uma superfície esférica de área A é igual a essa área A, dividido pelo quadrado do raio da esfera. A unidade deste ângulo é dada pelo estereorradiano (sr). Desde que a área da superfície de uma esfera é dada por  $4\pi R^2$ , existem  $4\pi$  estereorradianos de ângulo sólido numa esfera.

A Intensidade Radiante de uma fonte numa dada direção é o Fluxo Radiante por unidade de ângulo sólido que deixa essa fonte nessa direção. O símbolo mais freqüentemente usado para representar a Intensidade Radiante é I e é expressa em Watt/estereorradianos (W/sr). Se uma fonte é isotrópica, ou seja, radia igualmente em todas as direções, então a intensidade radiante dessa fonte que emite um fluxo é:

$$I = \phi / 4\pi \text{ W/sr} \quad (6)$$

O termo Intensidade Radiante só se aplica a uma fonte pontual, assim como mostrado na Figura 7. Contudo, quando se considera uma dada fonte pontual, suas dimensões físicas não interferem na discussão. Por exemplo, na determinação da Irradiância de uma fonte circular plana com 1 m de raio, incidente sobre um ponto situado a 10 m de distância, esta fonte poderá ser considerada pontual. Se, no entanto, essa mesma Irradiância fosse registrada sobre um filme fotográfico plano presente numa câmera fotográfica situada a essa mesma distância da fonte em questão, esta não poderia ser considerada pontual porque, neste caso, suas dimensões interfeririam nos cálculos.

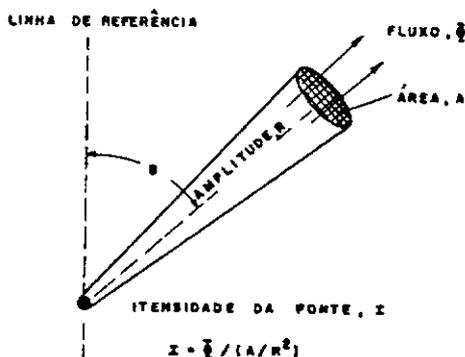


Fig. 7-Intensidade Radiante de uma fonte pontual.

FONTE: Suits(1983)

A Radiância é definida como o Fluxo Radiante por unidade de ângulo sólido que deixa uma fonte numa dada direção por unidade de área projetada da fonte nessa direção. A Figura 8 ilustra o conceito de Radiância.

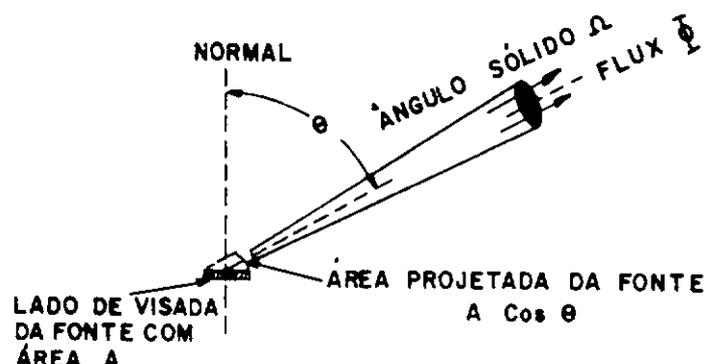


Fig. 8-Conceito de Radiância.

FONTE: Suits (1983)

O símbolo normalmente designado para expressar a Radiância é  $L$  e sua unidade de medida é Watt /m<sup>2</sup> .estereorradiano (W/m<sup>2</sup> .sr). O conceito de Radiância corresponde ao conceito de brilho. Muitos aspectos em sensoriamento remoto se relacionam com o Fluxo Radiante que parte de extensas áreas em direção ao sensor. Conseqüentemente, o conceito de Radiância é freqüentemente usado, e pois sua compreensão é importante.

A área projetada numa direção que faz um ângulo  $\theta$  com a normal de uma fração de uma área plana  $A$  é dada por  $A \cdot \cos \theta$ . Se essa fração plana de área for tão pequena a ponto de ser considerada uma fonte pontual, a Intensidade Radiante dessa fração na direção é :

$$I = L \cdot A \cdot \cos \theta \quad (7)$$

A fonte plana na qual a Radiância  $L$  não varia como uma função do ângulo de visada é chamada fonte Lambertiana. Um pedaço de papel branco quando iluminado pela luz difusa do céu é uma boa aproximação de uma fonte Lambertiana, uma vez que a percepção visual de seu brilho não varia com a variação do ângulo de observação.

### 2.3.2-QUANTIDADES ESPECTRAIS

Na apresentação das grandezas  $Q$ ,  $\phi$ ,  $M$ ,  $I$  e  $L$ , a energia foi tratada de forma global; contudo o Fluxo Radiante é composto pelos chamados componentes espectrais. Em sensoriamento remoto é comum considerar as chamadas bandas espectrais no tratamento da REM. Desta forma faz-se importante definir a banda espectral considerada na quantificação de cada uma das grandezas apresentadas. Se se desejasse comparar o Fluxo Radiante de todos os componentes com comprimentos de onda compreendidos na faixa ou banda de 0,4  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$  com o Fluxo Radiante de todos os componentes com comprimentos de onda compreendidos na faixa de 0,7  $\mu\text{m}$  a 1,1  $\mu\text{m}$ , então o símbolo deveria ser acompanhado da banda ou faixa designada [ $\phi$  (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) e  $\phi$  (0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ )]. Uma alternativa para simplificar essa representação é designar números para cada uma destas bandas. Assim a banda 1 poderia ser definida de 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$  e a banda 2 de 0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ . A representação simplificada ficaria:  $\phi_1$  e  $\phi_2$ , respectivamente.

O Fluxo Radiante não se distribui igualmente ao longo do espectro eletromagnético e a maneira pela qual ele se distribui é chamada distribuição espectral. A

distribuição espectral do Fluxo Radiante é determinada medindo-se o Fluxo Radiante em estreitos intervalos de comprimento de onda. Se estes intervalos forem tomados infinitesimalmente pequenos, surge o conceito de Fluxo Radiante Espectral, que é representado pelo símbolo  $\phi$  e é expresso por Watt/unidade de comprimento de onda. Os valores do Fluxo Radiante Espectral para todos os comprimentos de onda especificam a chamada distribuição espectral do Fluxo Radiante.

O mesmo conceito de espectralidade pode ser aplicado para as demais quantidades radiométricas. Assim tem-se:

$Q_\lambda$  = Energia Radiante Espectral;  
 $E_\lambda$  = Irradiância Espectral;  
 $M_\lambda$  = Exitância Espectral;  
 $I_\lambda$  = Intensidade Radiante Espectral;  
 $L_\lambda$  = Radiância espectral.

De todos estes parâmetros, a Radiância Espectral é o único que contempla os aspectos geométricos implícitos às técnicas de sensoriamento remoto, uma vez que no processo de coleta de dados a fonte de REM assume uma posição no espaço que confere um determinado ângulo de incidência da REM sobre a superfície ou objeto considerado, e ainda o dispositivo responsável pela coleta da radiação refletida ou emitida (sensor) por essa superfície ou objeto também assume outra posição espacial que define o chamado ângulo de visada. Vê-se portanto que o que efetivamente é "sentido" por esse sensor é a Radiância, e se este for dotado de sensibilidade espectral, esta Radiância será a Radiância Espectral.

Um fato importante que deve ser salientado é a vinculação da Radiância Espectral coletada ou registrada por um sensor com a Intensidade Radiante Espectral. Para um mesmo objeto, o valor da Radiância Espectral poderá variar em função da qualidade e intensidade da REM incidente sobre ele. Pela análise da Figura 2 pode-se verificar que a intensidade da REM radiada pelo Sol apresenta variações ao longo do Espectro eletromagnético. Assim, espera-se que, para um objeto posicionado na superfície terrestre sujeito à incidência da REM provinda do Sol, os maiores valores da Radiância Espectral sejam encontrados na região do visível, pois é nessa região que a REM é mais intensa. Aqui verifica-se uma limitação do uso da Radiância Espectral na caracterização espectral de objetos, e a necessidade do desenvolvimento de um novo conceito que viabilize o estudo do comportamento espectral de objetos, doravante denominados **alvos**.

Para o caso da REM refletida numa dada direção, esta o será de acordo com a intensidade e composição espectral do Fluxo radiante provindo da fonte e das características físico-químicas do alvo em estudo. Se o Fluxo Radiante Espectral refletido pelo alvo for dividido pelo Fluxo Radiante Espectral incidente sobre este mesmo alvo, os valores resultantes, para cada comprimento de onda, dever-se-ão única e exclusivamente às características do alvo. A esta relação entre os dois fluxos mencionados é dado o nome de Reflectância Espectral.

A Reflectância Espectral nada mais é do que um fator compreendido entre 0 e 1, que pode ser também expresso em porcentagem, que representa a relação entre a REM refletida por um alvo e a REM incidente sobre este. Uma vez que existem três fenômenos possíveis quando da incidência da REM sobre um alvo: Reflexão, Transmissão e Absorção; além da Reflectância Espectral, têm-se a Transmitância e a Absortância Espectrais. O que significa que todos os alvos apresentam valores mensuráveis relativos às três razões mencionadas.

A Reflectância Espectral pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$\rho = \phi \text{ refletido} / \phi \text{ incidente}$$

Da mesma forma a Transmitância Espectral pode ser expressa por:

A Absortância Espectral é representada pela diferença entre a unidade e a soma dos valores dos parâmetros anteriores. Portanto:

$$a=1-\rho+\tau \quad (8)$$

Na aplicação dos conceitos descritos anteriormente estão inseridos os aspectos geométricos mencionados. Assim, o Fluxo Radiante refletido, transmitido e incidente estaria acontecendo numa determinada condição geométrica, inerente à situação considerada (forma do alvo, distâncias da fonte de REM e o alvo, ângulos de visada e incidência, etc.). Quando esta condição é especificada, as grandezas Reflectância, Transmitância e Absortância espectrais são denominadas Bidirecionais. O termo Bidirecional refere-se ao fato de que existem dois ângulos implícitos: o de incidência da REM e o de visada, no qual a REM refletida ou transmitida será coletada.

Quando esta condição geométrica não é especificada, a Reflectância, a Transmitância e a Absortância Espectrais são ditas Hemisféricas. Este termo, por sua vez, refere-se ao fato de que o Fluxo Radiante espectral incidente sobre um alvo provém de todas as trajetórias possíveis que podem ser representadas por todos os ângulos de incidência possíveis. A representação gráfica destes ângulos recai sobre a forma de uma abóbada ou semi-esfera, posicionada sobre o alvo. A Figura 9 ilustra essa representação.

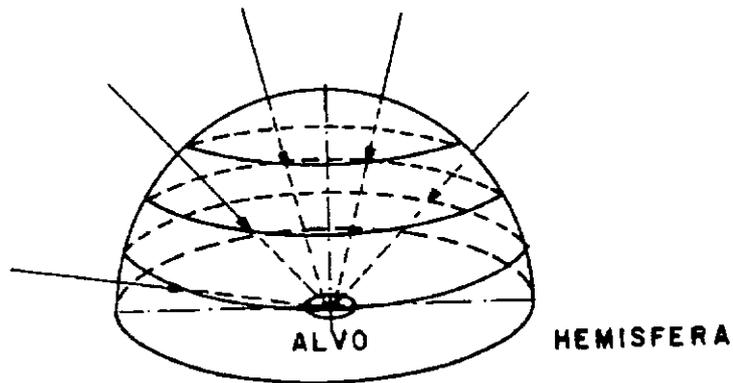


Fig. 9 - Representação gráfica dos possíveis ângulos de incidência sobre um alvo.

Da mesma forma que ocorre a incidência da REM, como ilustrado na Figura 9, ocorre sua reflexão, ou seja, em todas as direções. Para o caso da transmissão, o alvo estaria posicionado no plano equatorial do interior de uma esfera e num dos hemisférios ocorreria a incidência da REM, enquanto no outro hemisfério ocorreria a sua transmissão.

Nestes casos, a Reflectância, a Transmitância e a Absortância Espectrais Hemisféricas são dadas por:

$$\begin{aligned} \rho_{\lambda} &= M_{\lambda} \text{ refletida} / E_{\lambda} ; \\ \tau_{\lambda} &= M_{\lambda} \text{ transmitida} / E_{\lambda} ; \\ a_{\lambda} &= 1 - \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} \end{aligned} \quad (9)$$

Na maioria dos trabalhos existentes na literatura sobre o estudo do comportamento espectral de alvos são apresentados e discutidos estes parâmetros hemisféricos, porém existem alguns poucos trabalhos que têm utilizado parâmetros bidirecionais. Vale a pena salientar que, para o caso da maioria dos sensores colocados a bordo de plataformas aéreas e/ou orbitais, os parâmetros bidirecionais assumem maior importância.

### 3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS

#### 3.1-CONSIDERAÇÕES GERAIS

O termo **comportamento espectral** é comumente relacionado a maneira pela qual um determinado alvo reflete a REM sobre ele incidente. Para tanto, usa-se a Reflectância Espectral Hemisférica na caracterização desse comportamento, uma vez que os espectrofotômetros, que são os equipamentos mais utilizados na quantificação dessa Reflectância, são os mais freqüentemente utilizados nas medições espectrorradiométricas. A Reflectância Espectral Bidirecional é mencionada em alguns trabalhos, mas em menor freqüência.

A rigor, quando há o interesse de se conhecer o comportamento espectral de um alvo, devem ser consideradas a Reflectância, a Transmitância e a Absortância Espectrais Hemisféricas e/ou Bidirecionais, pois são estes três parâmetros que definem tal comportamento para determinadas condições experimentais ou de coleta da REM a ser medida.

O conhecimento do comportamento espectral de alvos e dos fatores que nele interferem no tipo de comportamento é fundamental na otimização da utilização dos dados coletados remotamente já disponíveis, em forma fotográfica ou digital, bem como na definição de novos sensores, do tipo de processamento a que devem ser submetidos estes dados e mesmo na definição da forma de aquisição de dados (geometria de coleta, freqüência, altura ou distância de coleta/ imageamento, resoluções espacial, espectral, etc).

O comportamento espectral de alvos é normalmente estudado sob a forma gráfica. A análise pura e simples de uma curva espectral, como assim é denominada a função que representa a Reflectância Espectral (Hemisférica ou Bidirecional) de um dado alvo, não fornece informações suficientes, a menos que se tenham à disposição informações relativas às condições de coleta dos dados que a geraram. Estas informações devem incluir o tipo de instrumentação utilizada e as condições experimentais (local, altura do equipamento, visada vertical ou oblíqua, horário das medições, condições climáticas, etc) nas quais foram realizadas as medições espectrorradiométricas.

Novo(1989) apresenta um excelente exemplo ilustrativo da importância destas informações. Neste exemplo são apresentadas curvas da Reflectância Espectral Bidirecional de talhões de trigo, obtidas em condições experimentais diferentes, as quais encontram-se apresentadas na Figura 10.

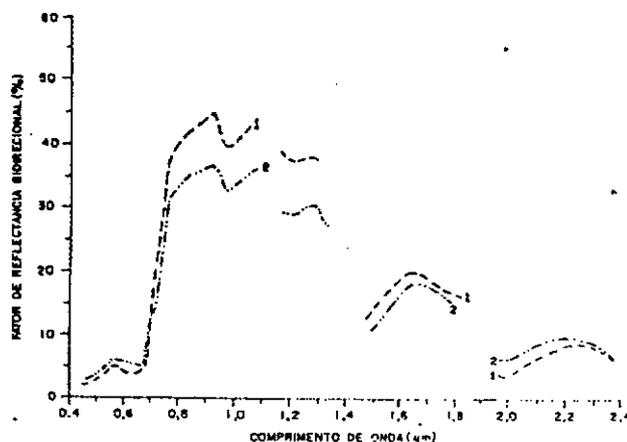


Fig. 10-Curvas de Reflectância espectral bidirecional do trigo, construídas a partir de medidas tomadas em diferentes condições experimentais.

FONTE: Novo(1989)

A curva 1 foi obtida a partir de medidas realizadas em Garden City, Kansas (EUA), com o auxílio do espectrorradiômetro Exotech 20D (Hixson et al.(1978) apud Novo(1989). A altura da operação deste instrumento sobre os talhões de trigo foi de 6 m. A curva 2 foi obtida a partir do espectrorradiômetro F.S.A.S. que possui uma resolução espectral diferente da do Exotech 20D. Observa-se, pela análise da Figura 10, que em algumas faixas espectrais as curvas diferem entre si em maior amplitude, contudo ambas mantêm a mesma forma. Estas diferenças se devem a variações nas condições experimentais.

A partir deste exemplo conclui-se que a análise de curvas semelhantes a estas apresentadas, sem o conhecimento das condições que as geraram não é suficiente para a compreensão do comportamento espectral de alvos.

Um dos fatores de maior influência na forma das curvas espectrais de alvos é a forma de aquisição das medidas dos três parâmetros espectrais mencionados. Estas medidas podem ser feitas de três maneiras principais: em laboratório, no campo ou a partir de uma plataforma elevada (helicóptero, avião, satélite, torre, etc). Cada uma destas maneiras determina diferentes resultados, uma vez que estes são afetados pelos demais fatores que interferem na tomada das medidas.

### 3.2-GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para qualquer uma das maneiras de aquisição de dados mencionadas, os aspectos geométricos intrínsecos ao processo de coleta de dados espectrorradiométricos exercem grande influência nas medições.

Os parâmetros geométricos em questão referem-se às posições espaciais assumidas pela fonte de REM, pelo alvo e pelo equipamento responsável pela coleta dos dados. Estas posições são expressas sob a forma angular.

A Figura 11 representa os possíveis ângulos envolvidos numa missão de coleta de dados espectrorradiométricos, na qual o Sol é considerado como uma fonte de REM e um satélite como a plataforma de sustentação do sensor. Vale salientar que os mesmos aspectos geométricos estariam envolvidos em outras missões, nas quais outras fontes de REM e outros equipamentos estivessem sendo considerados; incluindo o nível de aquisição (laboratório, campo, aeronave ou orbital).

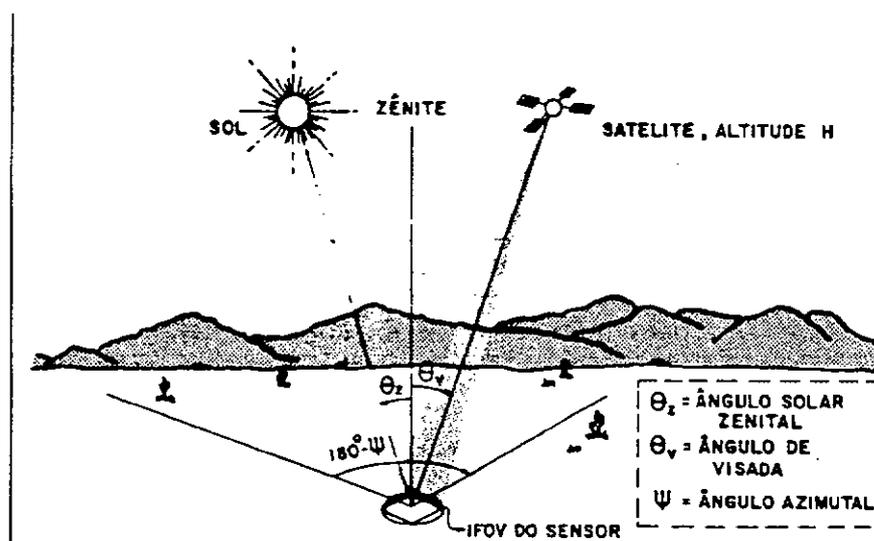


Fig. 11-Geometria de aquisição de dados.

FONTE: Novo(1989)

Na Figura 11 encontram-se os seguintes ângulos:

- Ângulo zenital solar ( $\theta_s$ );
- Ângulo zenital de visada ( $\theta_v$ );
- Ângulo azimutal relativo ( $\psi_o$ ).

Além destes ângulos, encontra-se representada a altura (H) do sensor em relação ao plano da base do alvo.

O ângulo zenital solar é também conhecido pelo termo "elevação" solar e sua determinação é feita através de tabelas já elaboradas ou pelo emprego de algoritmos especialmente desenvolvidos e implementados em computadores, levando-se em consideração o dia do ano, hora de interesse, latitude e longitudes locais. O ângulo zenital de visada é também conhecido como ângulo de visada e se refere ao ângulo formado entre a normal local e a direção de visada do instrumento utilizado na coleta de dados radiométricos. O ângulo azimutal relativo é o ângulo formado entre as projeções, no plano horizontal, da fonte de iluminação e o sensor.

A Tabela 2 apresenta o efeito de cada um destes parâmetros sobre as medidas espectrorradiométricas.

Tabela 2-Efeito dos parâmetros envolvidos na geometria de aquisição de dados sobre as medidas espectrorradiométricas (Adaptado de Novo(1989)).

Variável	Efeito sobre as medidas de Reflectância
Ângulo zenital solar	Aumento=> diminuição da Irradiância na superfície do alvo ou seja, diminuição da porcentagem de energia refletida pela superfície; aumento da porcentagem de incidência de radiação difusa sobre a superfície do alvo, ou seja, aumento do componente de radiação sobre o alvo.
Ângulo zenital de visada	Aumento=> aumento do componente de radiação da atmosfera na energia refletida pela superfície; redução do contraste entre os alvos; aumento da influência da anisotropia da reflectância sobre as medidas radiométricas.
Ângulos azimutais solar e de visada	Influenciam na distribuição de energia na superfície do alvo no caso de culturas plantadas em linhas e no caso de lineamentos geológicos.
Ângulo azimutal relativo	Influência na porcentagem de energia registrada pelo sensor em cada comprimento de onda em função da não-Lambertianidade do alvos.
Altitude do sensor	Aumento=>aumento da interferência da radiação na medida de reflectância do alvo.

### 3.3-PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS

Dentre os parâmetros atmosféricos que interferem nas medidas espectrorradiométricas, destacam-se a umidade atmosférica, a presença e quantidade de aerossóis, etc.

A umidade atmosférica interfere através da absorção da REM na trajetória do Fluxo Radiante entre a fonte e o alvo e entre este último e o sensor. Modificações na umidade provocam alterações na intensidade das bandas de absorção da água, além de interferirem no tipo e na concentração de aerossóis que alteram as características do espalhamento da REM. De modo geral, considera-se que o aumento da concentração de aerossóis implica num aumento do espalhamento. A Figura 12 ilustra o efeito da visibilidade atmosférica sobre a Reflectância de superfícies. A Reflectância Espectral medida sob a influência da atmosfera é denominada Reflectância Aparente ( $\rho_a$ ).

a) para um alvo com Reflectância (por exemplo  $\rho = 0,1$ ), a diminuição da visibilidade (aumento de turbidez) determina um aumento da Reflectância Aparente ( $\rho_A$ ), sendo este aumento mais pronunciado em comprimentos de onda menores;

b) para um alvo com Reflectância média (por exemplo  $\rho = 0,4$ ), a atmosfera pode aumentar ou diminuir a Reflectância Aparente ( $\rho_A$ ) em função da visibilidade e do comprimento de onda;

c) para um alvo com alta Reflectância (por exemplo  $\rho = 0,7$ ), o efeito atmosférico se faz no sentido de diminuir a Reflectância Aparente ( $\rho_A$ ) em todos os comprimentos de onda.

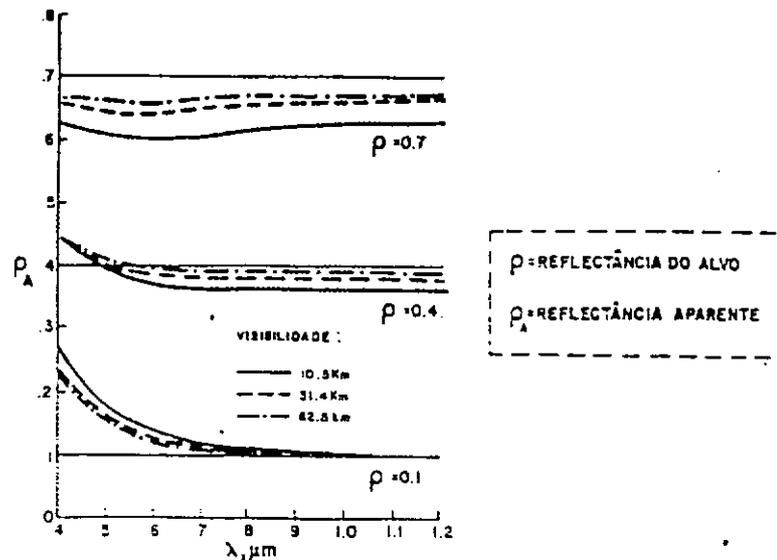


Fig. 12-Efeito da visibilidade sobre a Reflectância Aparente de três diferentes superfícies.

FONTE: Novo (1989)

Pode-se observar as seguintes tendências:

Estes parâmetros devem sempre ser considerados quando o interesse for a determinação do comportamento espectral de alvos valendo-se de plataformas aéreas e/ou orbitais.

Existem modelos matemáticos destinados a quantificar a influência atmosférica, corrigindo assim os valores de  $\rho_A$  no sentido de tornar seus valores mais próximos da Reflectância do objeto ou cena. Estes modelos são muito utilizados em estudos da Reflectância de alvos medida em nível orbital.

#### 4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

O termo "comportamento espectral da vegetação" é freqüentemente utilizado para representar as características de reflexão da REM por parte de folhas, plantas individuais e conjunto de plantas. Contudo, convém ressaltar que intrínsecos ao termo "comportamento espectral" estão os conceitos de Reflectância, Transmitância e Absortância Espectrais (Hemisféricas ou Bidirecionais), ou seja; caracterizar o comportamento espectral de um alvo significa conhecer como se dá a interação da REM com este alvo, em termos de reflexão, transmissão e absorção.

Para o sensoriamento remoto dos recursos naturais, a reflexão é o fenômeno mais importante, uma vez que normalmente considera-se a REM refletida pelos alvos existentes na

superfície terrestre. Isso explica a rápida associação do termo "comportamento espectral" à Reflectância Espectral (Hemisférica ou Bidirecional).

Ainda deve ser ressaltado outro aspecto relacionado ao termo "vegetação". Sob o ponto de vista fitogeográfico, "vegetação" refere-se ao conjunto de plantas (de um mesmo grupo fisionômico ou não) que ocupa uma determinada área geográfica. Associado ao termo "comportamento espectral", o termo "vegetação" tem sido usado para representar as propriedades espectrais de partes de uma planta, assim como folhas, galhos, etc; uma planta e até conjuntos de plantas.

Experimentos têm sido conduzidos em todo o mundo voltados para a caracterização do comportamento espectral de partes de plantas, plantas e conjuntos de plantas, visando o atendimento de necessidades específicas que se estendem desde um simples trabalho acadêmico, até a aquisição de dados compatíveis a modelos matemáticos destinados a previsão de fenômenos e/ou a estimativa de parâmetros biofísicos.

O objetivo deste capítulo é fornecer algumas informações sobre teorias e experimentos relacionados a caracterização do comportamento espectral de folhas, de conjuntos de plantas (de copas), e sobre modelos matemáticos considerados na estimativa de parâmetros relacionados à vegetação.

#### 4.1-FOLHAS

Uma folha típica é constituída de três tecidos básicos que são: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular. A folha é então coberta por uma camada de células protetoras epidérmicas, na qual muitas vezes se desenvolve uma fina e relativamente impermeável superfície externa. Abaixo da epiderme encontra-se o mesófilo fotossintético, o qual por sua vez, freqüentemente é subdividido numa camada ou em camadas de células paliçádicas alongadas, arranjadas perpendicularmente à superfície da folha, que formam o parênquima. As células do parênquima são ocupadas por seiva e protoplasma.

Esparsos através do mesófilo estão os espaços intercelulares cheios de ar, os quais se abrem para fora através dos estômatos. Esta rede de passagens de ar constitui a via de acesso pela qual o  $\text{CO}_2$  alcança as células fotossintéticas e o  $\text{O}_2$  liberado na fotossíntese retorna à atmosfera externa. Uma terceira característica estrutural da folha é o tecido vascular. A rede de tecidos do sistema vascular não serve somente para suprir a folha com água e nutrientes do solo, mas também constitui a passagem pela qual fluem os produtos da fotossíntese que são produzidos na folha para as demais partes da planta. As estruturas das células que compõem os três tecidos das folhas são muito variáveis, dependendo da espécie e das condições ambientais.

O tamanho da estrutura celular da folha é grande quando comparada com os comprimentos de onda da REM. As dimensões típicas das células paliçádicas, do parênquima esojoso e células epidérmicas são:  $15 \mu \times 15 \mu \times 60 \mu$ ,  $18 \mu \times 15 \mu \times 20 \mu$  e  $18 \mu \times 15 \mu \times 20 \mu$ , respectivamente. A camada impermeável da folha tem uma espessura muito variável, oscilando entre  $3 \mu$  a  $5 \mu$ . Clements(1904), apud Kumar(1972), apresentou uma excelente discussão sobre as dimensões físicas e relações da estrutura foliar. Os cloroplastos (pigmentos responsáveis pelo armazenamento da clorofila) suspensos no protoplasma (meio interno da célula) têm geralmente  $5 \mu$  a  $8 \mu$  de diâmetro e cerca de  $1 \mu$  de comprimento. Cerca de 50 cloroplastos podem estar presentes em cada célula do parênquima. Dentro dos cloroplastos estão os grana, dentro dos quais encontra-se a clorofila. Os grana podem ter  $0,5 \mu$  de comprimento e  $0,05 \mu$  de diâmetro.

Os constituintes da folha que são considerados os mais importantes sob ponto de vista da interação com a radiação são: celulose (encontrada nas paredes celulares), solutos (ions, moléculas), espaços intercelulares e pigmentos existentes dentro dos cloroplastos.

O comportamento espectral de uma folha é função de sua composição, morfologia e estrutura interna. Desde que as características da folha são geneticamente controladas, existirão diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente distintos.

A Figura 13 ilustra os possíveis caminhos da luz ou energia incidente sobre uma folha.

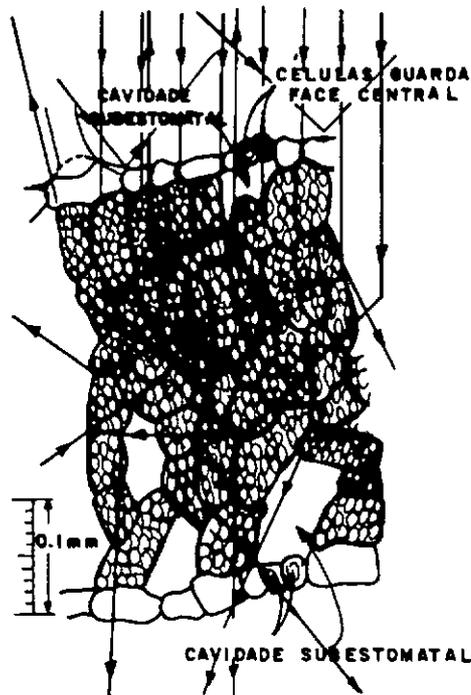


Fig. 13-Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente.

FONTE: Gates(1971)

Uma pequena quantidade de luz é refletida das células da camada superficial; a maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios incidem frequentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência forem suficientemente grandes. Esta reflexão múltipla é essencialmente um processo aleatório no qual os raios mudam de direção dentro da folha. Dado o grande número de paredes celulares dentro da folha, alguns raios são refletidos de volta para a fonte de luz ou energia, enquanto outros são transmitidos através da folha. A espessura da folha é fator importante no caminho da REM, já que geralmente a Transmitância é maior do que a Reflectância para folhas finas, mas o inverso acontece com folhas grossas.

A curva de Reflectância característica de uma folha verde está mostrada na Figura 14. Os comprimentos de onda relativos ao ultravioleta não foram considerados porque uma grande quantidade dessa energia é espalhada e a vegetação não faz uso desta.

A análise da Figura 14 indica que a região compreendida entre 0,4 a 2,6  $\mu\text{m}$  pode ser dividida em três áreas:

- a) região do visível (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ );
- b) região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ );
- c) região do infravermelho médio (1,3 a 2,6  $\mu\text{m}$ ).

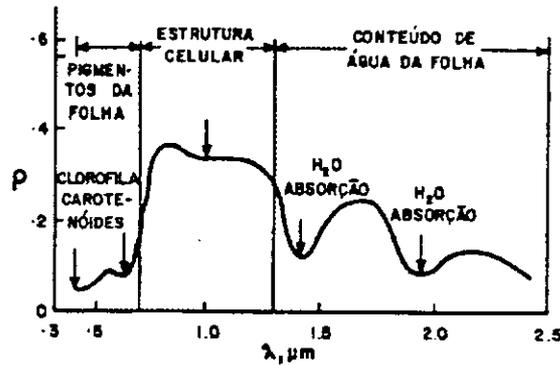


Fig. 14-Curva de Reflectância típica de uma folha verde.

FONTE: Novo(1989)

A seguir serão comentados alguns aspectos relacionados ao comportamento espectral da folha em cada uma destas regiões.

#### 4.1.1-REGIÃO DO VISÍVEL

Nesta região os pigmentos existentes nas folhas dominam a Reflectância Espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%). Os valores percentuais destes pigmentos apresentados nas folhas podem variar grandemente de espécie para espécie.

A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese. A Figura 15 mostra o espectro de absorção da clorofila, protoclorofila,  $\alpha$ -caroteno, xantofila e da água líquida.

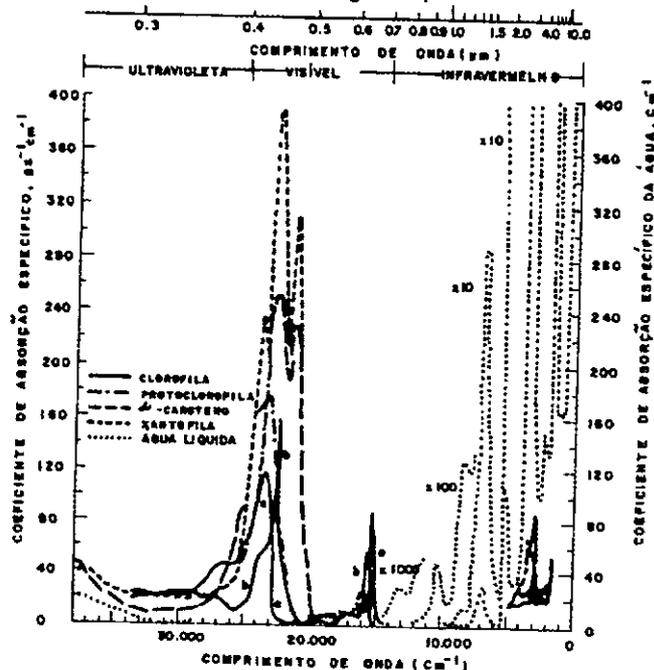


Fig. 15-Espectro de absorção de alguns pigmentos.

FONTE: Gates(1965)

Nota-se que os pigmentos predominantes absorvem na mesma região (próximo a  $0,445 \mu\text{m}$  que é a região do azul), mas somente a clorofila absorve na região do vermelho ( $0,645 \mu\text{m}$ ). A maioria das plantas são moderadamente transparentes na região do verde ( $0,54 \mu\text{m}$ ). Shul'gin e Keshnin (1959), apud Kumar (1972), estudando 80 espécies, observaram que a absorção da energia radiante na região de  $0,55 \mu\text{m}$  a  $0,67 \mu\text{m}$  aumenta proporcionalmente com o aumento do conteúdo de clorofila. Similar conclusão foi encontrada por Tageeva et al. (1960), apud Kumar (1972), que estudaram a correlação entre o conteúdo de clorofila e as propriedades ópticas de três espécies.

Curvas de Reflectância Espectral Hemisférica de folhas de *Coleus* sp. contendo diferentes pigmentos encontram-se apresentadas nas Figuras 16 e 17, para as regiões espectrais de  $0,5 \mu\text{m}$  a  $0,9 \mu\text{m}$  e  $0,5 \mu\text{m}$  a  $2,5 \mu\text{m}$ , respectivamente.

Verifica-se que a folha branca de *Coleus* sp. sem qualquer pigmentação apresentou um alto nível de Reflectância na região compreendida entre  $0,5$  a  $0,9 \mu\text{m}$  (ver Figura 16). A folha da mesma espécie, que tem como pigmento dominante a clorofila apresentou a curva de Reflectância Espectral com uma forma típica àquela apresentada por uma folha verde (ver Figura 14). A folha vermelha apresentou uma baixa Reflectância nas porções do espectro eletromagnético correspondentes ao azul e ao verde, então um aumento significativo na região do vermelho. Uma folha roxa ("reddish-purple") apresentou uma Reflectância relativamente baixa na região do visível e um forte aumento na região do infravermelho, coincidente com o comportamento de uma folha verde típica. A Figura 17 mostra que a reflectância espectral de uma folha nos comprimentos de onda relativos ao infravermelho refletido é quase independente da pigmentação.

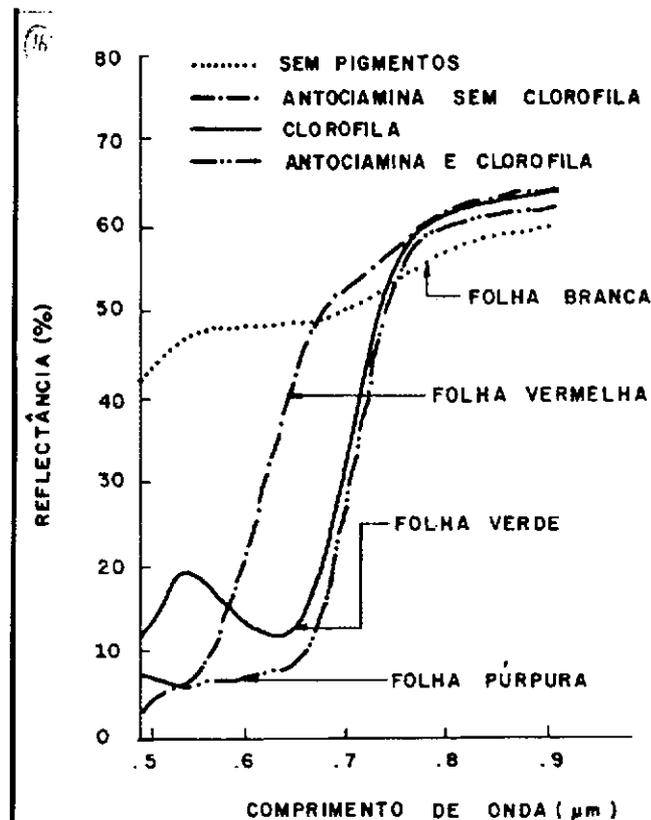


Fig. 16-Curva de Reflectância de folhas de *Coleus* sp.

FONTE: Kumar(1972)

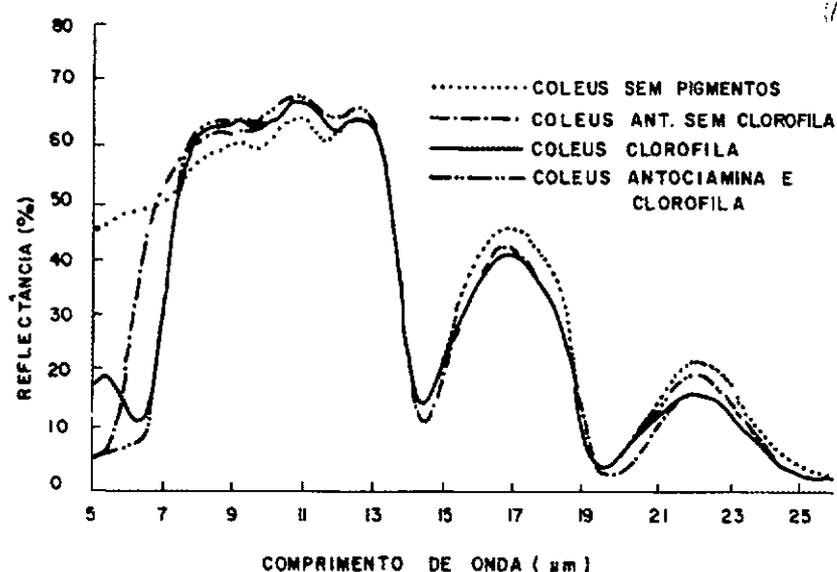


Fig. 17 - Curva de Reflectância de folhas *Coleus sp.*

FONTE: Kumar(1972)

#### 4.1.2-REGIÃO DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

Nesta região existe uma absorção pequena da REM e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região. A Reflectância Espectral é quase constante nessa região (ver Figura 14). Gates(1971) menciona que a Reflectância Espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a Reflectância de uma folha nesta região.

#### 4.1.3-REGIÃO DO INFRAVERMELHO MÉDIO

A absorção devido à água líquida predomina na Reflectância Espectral das folhas na região do infravermelho médio. Considerando a água líquida, esta apresenta, na região em torno de 2,0 µm, uma Reflectância geralmente pequena, sendo menor do que 10% para um ângulo de incidência de 65 e menor do que 5% para um ângulo de incidência de 20°, dada a forte absorção da água. A água absorve na região de 1,3 a 2,0 µm. As faixas ou bandas de absorção da água são: 1,1; 1,45; 1,95; 2,7 e 6,3 µm. A influência do grau de umidade na Reflectância de um grupo de folhas de milho está mostrado na Figura 18.

Pode-se verificar que um pequeno decréscimo na reflectância é visto na primeira faixa de absorção da água para amostras de folhas de 0 a 40% de grau de umidade. A primeira faixa de absorção da água torna-se bastante evidente para amostras contendo 40 a 54% de umidade, e a forma geral da curva na região de 1,3 a 2,6 µm é assumida para folhas suculentas. As curvas referentes a 54 a 66% e 66 a 100% de umidade são geralmente similares. Na região na qual a umidade não exerce influência, existe uma consistente diferença de 3 a 4% na Reflectância. Examinando uma seção transversal de uma folha poderá ser constatado que essa diferença não se deve a absorção da água, mas sim pelas alterações estruturais que ocorrem na folha quando esta perder água.

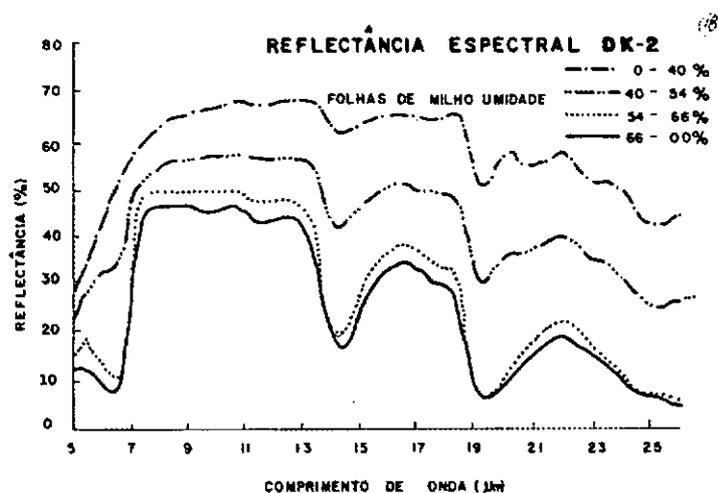


Fig. 18-Influência do grau de umidade na Reflectância de folhas de milho.

FONTE: Kumar(1972)

Pouca experimentação tem sido feita na determinação das características de espalhamento bidirecional de uma folha, dadas as dificuldades experimentais envolvidas. Breece e Holmes (1971) mediram as funções de distribuição da reflexão e transmissão bidirecionais para as folhas "in vivo" de soja e milho, para 19 bandas estreitas compreendidas entre 0,375 à 1,0  $\mu\text{m}$ . As funções de distribuição de reflexão medidas com incidência oblíqua mostraram consideráveis contribuições especulares em comprimentos de onda de forte absorção, enquanto as funções de distribuição de transmissão mostraram uma forma próxima à Lambertiana para todos os comprimentos de onda considerados.

#### 4.1.4-TEORIAS QUE TENTAM EXPLICAR A REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE FOLHAS

Levando em consideração o conceito da reflexão interna numa folha e os conhecimentos do espectro de absorção da clorofila, Willstatter e Stoll(1918), apud Kumar(1972), desenvolveram uma teoria sobre a trajetória da REM dentro de uma folha, a qual é até hoje válida. Os autores basearam sua teoria na estrutura interna das folhas e na reflexão potencial das superfícies. Segundo eles, a trajetória da REM se daria ao longo de vários meios, sendo estes compostos pela água, ar, membranas celulares, etc. Um mesmo raio de radiação poderia passar, por exemplo, através de uma camada de água, que possui um índice de refração de 1,33, e em seguida atravessar um espaço preenchido com ar, que possui um índice de refração igual a 1. Além desta variação nos índices de refração dos diversos meios a serem atravessados, foi considerado que as células dos tecidos foliares, principalmente do mesófilo esponjoso, possuem uma estrutura irregular, sendo orientadas espacialmente sob diversos ângulos. Willstatter e Stoll imaginaram as possíveis trajetórias da REM dentro de uma folha conforme o esquema apresentado na Figura 19.

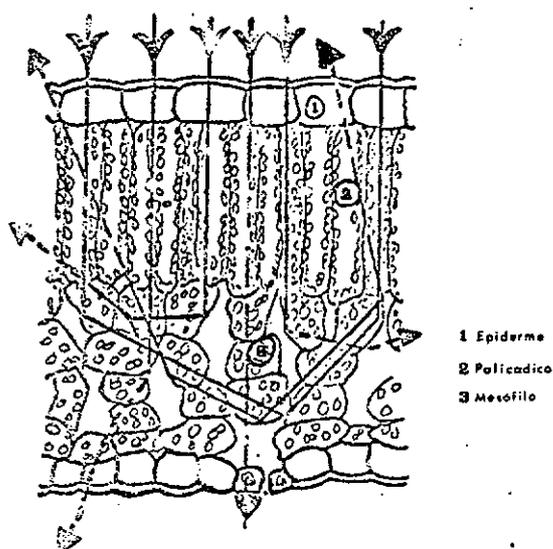


Fig. 19-Esquema das possíveis trajetórias da REM dentro de uma folha.

FONTE: Kumar(1972)

#### 4.1.4.1-REFLECTÂNCIA DAS FACES DORSAL E VENTRAL

A teoria descrita por Willstatter e Stoll (1918) pode explicar uma série de fenômenos que ocorrem na vegetação quando se considera a região do visível. Um exemplo desses fenômenos é a diferença nas Reflectâncias Espectrais das faces dorsal e ventral das folhas. Na face dorsal da maioria das folhas encontra-se o mesófilo esponjoso, e esta face é normalmente mais reflexiva do que a ventral. Essa distinção é mais evidente na região do visível, já que na região do infravermelho próximo, a Reflectância é aproximadamente igual para ambas as faces. Isso pode ser explicado pela existência de pigmentos nos cloroplastos que ocorrem em maior quantidade na parte superior do mesófilo, ocasionando uma maior absorção da REM na face ventral; ou ainda pela presença da camada impermeável de cera (cutícula) na face ventral. A hipótese da distribuição dos cloroplastos parece ser a mais consistente, uma vez que vários autores concluíram que a presença de pelos e/ou outros tipos de superfícies sobre a face ventral não necessariamente atuam sobre a Reflectância Espectral das folhas no sentido de elevá-la.

A Figura 20 apresenta a Reflectância Espectral das faces ventral e dorsal de folhas de *Syringa vulgaris*.

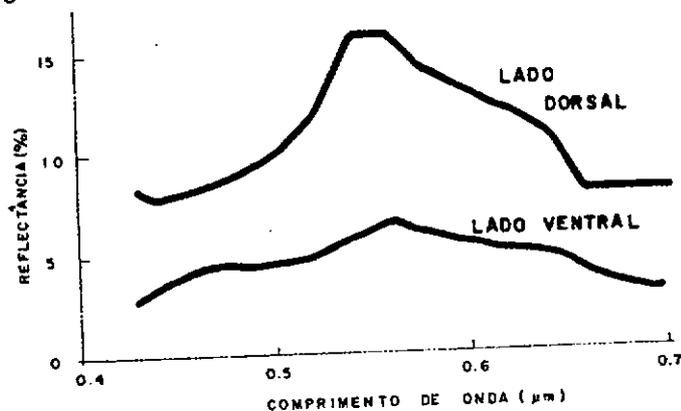


Fig. 20-Reflectância Espectral das faces ventral e dorsal de folhas de *Syringa vulgaris*.

FONTE: Kumar(1972)

Sinclair(1968), apud Kumar(1972), argumentou que desde que o parênquima esponjoso está localizado predominantemente na face dorsal, a explicação para a face ventral ser mais reflexiva na região do infravermelho parece ainda vaga. Ele também salientou que folhas mais velhas refletem mais do que as mais jovens e que folhas de sombra igualmente refletem mais do que as iluminadas constantemente, ambas as situações considerando a região do infravermelho, ao redor de 2,0  $\mu\text{m}$ . O inverso destas constatações é válido para a região do visível. A estrutura da folha e a cobertura da cutícula são os fatores mais influentes na Reflectância próximo a 2,0  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.4.2-PRESENÇA DE ÁGUA

Vários autores constataram que a Transmitância das folhas, na região do visível, aumenta com a infiltração de água. Eles acreditam que a água preenche os espaços intercelulares, eliminando as interfaces onde ocorreria a trajetória da REM, alterando a probabilidade de desvios. Esse fenômeno é aparentemente mais um reforço à teoria de Willstatter e Stoll. Entretanto outros autores, assim como Birth(1971), apud Kumar(1972), comentam que se os espaços intercelulares fossem totalmente preenchidos com água, a folha deveria ser essencialmente transparente, contudo isso não se verifica na prática. Outras interfaces deverão existir além da água e ar dentro de uma folha.

#### 4.1.4.3-MATURAÇÃO DA FOLHA

Vários autores, assim como Gates e Tantraporn(1952), apud Kumar(1972), têm verificado que a Reflectância de uma folha decresce com a idade na região do visível. Este fato pode ser atribuído ao desenvolvimento da clorofila, que aumenta em quantidade rapidamente nos estágios iniciais do desenvolvimento da folha, aumentando mais lentamente nos estágios subseqüentes, até que a coloração verde característica da espécie seja atingida.

Gausman et al.(1969) realizaram experimentos com plantas de algodão que haviam sido submetidas a um crescimento em ambiente com umidade controlada. Em geral, a Reflectância aumentou e a Transmitância decresceu no intervalo de 0,5  $\mu\text{m}$  a 2,5  $\mu\text{m}$  para as folhas maduras. Depois de um período de 12 dias, verificou-se um decréscimo na Reflectância e um acréscimo na Transmitância dessas mesmas folhas. Durante esse período de tempo, as folhas dobraram o número de espaços intercelulares e suas espessuras aumentaram em 14%, aproximadamente. Em geral, os resultados alcançados por estes autores reforçam a Teoria de Willstatter e Stoll(1918). A reflectância na região do infravermelho próximo, após os 12 dias, aumenta para as folhas mais velhas porque também aumenta o número de espaços intercelulares no mesófilo. A porcentagem de água nas folhas também aumenta com a idade.

#### 4.1.4.4-MODELO DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO

Revisando o que havia sido feito no sentido de explicar a trajetória da REM dentro de uma folha desde a teoria de Willstatter e Stoll, Mestre(1935), apud Kumar(1972), aprimorou uma análise teórica sobre esse assunto, compreendendo melhor e refinando velhos conceitos. Ele reconheceu que a Reflectância da REM ocorre tanto na superfície foliar quanto na estrutura interna e apresentou a seguinte equação para a resposta espectral de folhas:

$$A=1-(R1 + R2 + T) \quad (10)$$

onde: A = absorção total;  
 R1= reflexão causada pela superfície foliar;  
 R2= reflexão interna;  
 T = transmissão.

A hipótese na qual Mestre (1935) apud Kumar(1972) se baseou considerava que o fluxo de REM poderia ser refletido pela superfície foliar de maneira especular ou difusamente. A reflectância especular ocorreria em folhas com superfícies lisas e tenderia a obedecer a lei de Fresnel que define a intensidade dessa reflectância como uma função do ângulo de incidência e dos índices de refração dos materiais que formam as interfaces.

A reflectância difusa ocorreria a partir de folhas com superfícies tomentosas e a intensidade relativa desta Reflectância difusa seria característica de cada superfície em particular, atendendo à lei do Coseno de Lambert, a qual pode ser expressa por:

$$I_r = I_n \cdot \cos\theta \quad (11)$$

onde :  $I_r$  = intensidade refletida na direção  $\theta$ ;

$I_n$  = intensidade refletida na direção normal à superfície;

$\theta$  = ângulo formado entre a normal e a direção de incidência.

A REM que não é refletida pela superfície deverá penetrar no mesófilo foliar. Mestre (1935), apud Kumar(1972) considerou que quanto maior o poder de espalhamento do mesófilo, maior será a probabilidade da REM ser conduzida para fora da folha, seguindo uma trajetória oposta à penetração na folha. Ele considerou ainda que o espalhamento aumentaria a distância percorrida pela REM através da folha, aumentando a probabilidade desta vir a ser interceptada e absorvida por pigmentos. Neste momento, o autor atingiu uma contradição na qual o espalhamento explicaria uma maior reflexão simultaneamente à uma maior absorção.

Shul'gin e Kazanov (1961), apud Kumar(1972), mediram as Reflectâncias superficial e interna de folhas de forma a permitir a diferenciação entre ambas. Foram considerados ângulos de incidência de  $20^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Eles observaram que a reflectância especular era maior a ângulos de incidência maiores, enquanto que para ângulos menores, a reflectância interna tornou-se maior e difusa. Estes resultados concordam com as propostas de Mestre (1935), apud Kumar (1972).

Melamed(1963) determinou as propriedades ópticas de partículas de dimensões maiores do que os comprimentos de onda da REM. Parâmetros foram então transferidos para um modelo usado para relacionar a Reflectância difusa com o coeficiente de absorção, índice de refração e o diâmetro das partículas. Esta relação é comparada a medidas de materiais com diferentes índices de refração. Este modelo pode ser aplicado para prever a Reflectância e a Transmitância de uma folha.

Allen e Richardson (1968) usaram modelos matemáticos e teóricos de atenuação da REM ao atravessar um meio difuso para descrever a Reflectância e a Transmitância na região do infravermelho próximo de folhas maduras de algodão, que foram extraídas e colocadas dentro de um espectrofotômetro. O desvio padrão entre a teoria e a experimentação foi de aproximadamente 1%; uma discrepância muito pequena dentro das limitações experimentais. Estes modelos fundamentam-se nas relações propostas por Kubelka-Munk (1931), apud Kumar (1972), nas quais a Reflectância difusa é função de um coeficiente de espalhamento "s" e um coeficiente de absorção "k". A entidade básica da formulação Kubelka-Munch (K-M) são a Reflectância e a Transmitância de uma única folha.

Para que a aplicação destes modelos fosse eficaz, seria necessário que as teorias e suposições arquitetadas explicassem todos os fenômenos verificados no que se refere ao comportamento espectral das folhas. Contudo, na tentativa desta aplicação em caráter geral, iniciou-se uma fase de revisão mais profunda destes conceitos.

Gates et al.(1965) apresentaram alguns resultados que vieram a confirmar a teoria de Willstatter e Stoll(1918), apud Kumar(1972). Os autores explicaram seus resultados afirmando que seria provável que a Reflectância na região do infravermelho próximo fosse uma função da forma e tamanho das células, assim como da quantidade de espaços intercelulares. Inicialmente o mesófilo de folhas jovens é composto por células do parênquima esponjoso com uma considerável

quantidade de espaços preenchidos com ar, o que facilita o mecanismo de reflexão interna. Com o amadurecimento da folha, as células aumentam de tamanho tomando-se mais próximas umas das outras, reduzindo os espaços intercelulares preenchidos com ar e, conseqüentemente, reduzindo a Reflectância. Ao final do processo de amadurecimento a relação entre a estrutura celular e os espaços de ar torna-se favorável para o aumento da Reflectância.

Sinclair(1968), apud Kumar(1972), observou uma crítica a essa explicação dada por Gates et al.(1965). O processo de desenvolvimento foliar descrito por estes autores vai de encontro à teoria idealizada por Willstatter e Stoll, mas segundo a literatura específica, esse processo não se verifica na realidade para a maioria das folhas de dicotiledôneas. Vários autores como, por exemplo, Esau(1965), descrevem o desenvolvimento da estrutura de folhas como uma estrutura compacta, alterando-se para uma estrutura lacunosa. O mesófilo esponjoso não se desenvolve continuamente até o final do processo de amadurecimento da folha. Isso vai contra a hipótese de Gates et al.(1965) que imaginaram que tal desenvolvimento se dava no sentido de uma estrutura lacunosa alterando-se para outra mais compacta e que o aumento da Reflectância em folhas maduras se daria pela relação entre a estrutura e os espaços intercelulares. Estes autores concluem em seu artigo que experimentos deveriam ser conduzidos para melhor conhecer esta relação.

Knipling(1967), apud Kumar(1972), depois de revisar muitas publicações, concluiu que, apesar de existirem evidências de que a Reflectância de folhas é principalmente explicada por causas internas, não se conhece exatamente a posição das superfícies que causam a reflexão ou quais são as reais contribuições dos vários constituintes celulares nessa reflexão. A única coisa que se tem certeza é que a Reflectância tem como principal componente causas internas a folha.

Sinclair(1968), apud Kumar(1972), observou ainda que a face ventral de folhas de soja era mais reflexiva do que a face dorsal. Essa é uma clara contradição da teoria de Willstatter e Stoll, uma vez que a estrutura foliar mais densa do tecido paliçádico parece, neste caso, ser mais importante na alteração da trajetória da REM do que a estrutura lacunosa do mesófilo esponjoso. Ele ainda verificou que a Reflectância Espectral destas folhas aumentou com o decréscimo de umidade, exceto para os níveis de umidade mais altos (72-77% e 77-85%), nos quais houve um decréscimo da Reflectância com o decréscimo do teor de umidade. Esta é mais uma contradição à teoria de Willstatter e Stoll. O autor verificou também, através de exames de seções transversais de folhas, que o colapso e morte das células ocasionados por um processo de desidratação acarreta uma reorientação das células, chegando até a seu posicionamento perpendicular a incidência da REM. As paredes celulares das células desidratadas parecem ser as superfícies reflexivas nestas circunstâncias.

Myers e Allen(1968) compararam os coeficientes de espalhamento de folhas maduras normais e desidratadas de algodão. Eles verificaram que o coeficiente de espalhamento é determinado pelo número de interfaces de ar ao longo da trajetória da REM dentro da folha. O coeficiente de espalhamento para as folhas normais pode ser explicado pela lei de reflexão de Fresnel considerando 35 interfaces de ar ao longo dessa trajetória. O coeficiente de espalhamento das folhas desidratadas pode ser explicado pela mesma lei, considerando 70 interfaces de ar. Uma célula pode ser visualizada como um saco plástico de 20  $\mu$  preenchido com água. A célula desidratada seria este saco vazio e enrugado, o que implicaria no fato de que esta célula teria cerca de 20 vezes mais interfaces do que uma célula normal. O coeficiente de espalhamento para uma folha seca seria portanto cerca de 20 vezes maior do que o de uma folha normal.

A maioria dos modelos propostos para explicar a Reflectância Espectral de folhas considera uma série de fatores, leis e condições ideais. Uma delas se refere a forma plana das superfícies internas reflexivas. Birth(1971), apud Kumar(1972), mencionaram que as equações das leis de Fresnel e Snell, normalmente utilizadas nos modelos mencionados, não são válidas para folhas porque as superfícies planas simplesmente não existem dentro destas, exceto numa escala sub-microscópica. Cada interface é, em realidade, uma superfície curva; assim a passagem da REM através da folha deveria ser vista como sendo controlada por numerosas interfaces curvas.

#### 4.1.4.5-EFEITO DO ESTRESSE

Os efeitos de estresses causados pelo ataque de insetos, doenças, problemas fisiológicos e condições ambientais adversas também alteram a Reflectância Espectral de folhas. Infelizmente tais efeitos têm sido pouco estudados, apesar de constituir matéria promissora e de grande utilidade para o avanço científico.

Colwell(1956), apud Kumar(1972), estudou a Reflectância Espectral de folhas infestadas por fungos e folhas saudáveis. A Reflectância de folhas doentes foi maior do que a das saudáveis na região do visível, o que provavelmente pode ser explicado pela perda da clorofila. Contudo ela foi menor na região do infravermelho (acima de  $1,08 \mu\text{m}$ ), o que pode ser atribuído pela invasão das hifas nos espaços intercelulares.

Estresses ocasionados por deficiência edáfica foram também detectados em fotografias aéreas tomadas com o filme Ektachrome (infravermelho), por Myers et al.(1966), apud Kumar(1972). Knipling(1970) verificou que estresses fisiológicos afetam diretamente a Reflectância de folhas individuais, e que as alterações mais pronunciadas ocorrem na região do visível devido a sensibilidade da clorofila. O autor verificou também que o aumento na Reflectância na região do infravermelho pode ser causada pelo aumento da superfície de contato interna, ou pela orientação horizontal das superfícies reflexivas, dependendo do tipo de estresse hídrico.

## 4.2-INTERAÇÕES DA REM COM A VEGETAÇÃO

Quando a radiação solar incide sobre a vegetação ela é espalhada e refletida, e sua direção e composição espectral são alteradas de uma forma bastante complexa. Para o sensoriamento remoto da vegetação, parte dessa radiação alterada e refletida é interceptada e medida por sensores colocados a bordo de aeronaves e/ou satélites e o sucesso desse sensoriamento depende da habilidade de se relacionarem as medidas de Reflectância com as propriedades da vegetação. Isso somente é conseguido quando a natureza dessas alterações causadas pelos parâmetros da vegetação e do ambiente é perfeitamente compreendida.

### 4.2.1-MODELOS DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO

Um modelo de Reflectância da vegetação promove uma conexão lógica entre as características botânicas e biofísicas de um dossel, geometria da interação radiométrica e as resultantes alterações na radiação refletida. Desta forma estas alterações medidas remotamente podem ser utilizadas para inferir sobre as mencionadas características da vegetação.

O sistema completo envolvido no sensoriamento remoto da vegetação através de sua Reflectância é constituído pelos seguintes sub-sistemas:

a) A fonte de radiação : normalmente o Sol, definida por uma série de propriedades/parâmetros [ai]. Neles estão incluídos a Intensidade Espectral (I), e localização ( $\theta_0$ ,  $\psi_0$ ), onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $\theta_0$  e  $\psi_0$  são os ângulos zenital e azimutal da fonte, respectivamente;

b) Atmosfera : caracterizada por uma série de propriedades/parâmetros [bi]. Neles estão incluídos as concentrações espaciais, características de absorção e propriedades de espalhamento de aerossóis, vapor d'água e ozônio;

c) Vegetação : caracterizada por uma série de propriedades/parâmetros [ci]. Estão incluídos os parâmetros ópticos (Reflectância e Transmitância) e parâmetros estruturais (formas geométricas e posições) dos elementos da vegetação (folhas, galhos, ramos, etc.), geometria de plantio e parâmetros ambientais como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação. Em geral, estes parâmetros têm variação espectral, temporal e espacial;

d) Solo : caracterizado por uma série de propriedades /parâmetros  $[d_i]$  como reflexão e absorção, rugosidade, textura da superfície, densidade e umidade de perfil;

e) Detetor : caracterizado por uma série de propriedades/parâmetros  $[e_i]$  que por sua vez são caracterizados por sua sensibilidade espectral, abertura, calibração e posição ( $\theta$ ,  $\psi_0$ ; ângulo zenital de visada e ângulo azimutal de visada, respectivamente).

O sistema completo encontra-se esquematicamente representado na Figura 21. A radiação solar incide no topo da atmosfera. Parte dessa radiação é espalhada e/ou refletida pelas partículas da atmosfera e outra parte passa através dela e é refletida pelo dossel ou solo. A radiação refletida ou espalhada pelo dossel é detectada pelo detetor que pode ser colocado a bordo dos mais diversos tipos de plataformas terrestres, aéreas ou orbitais.

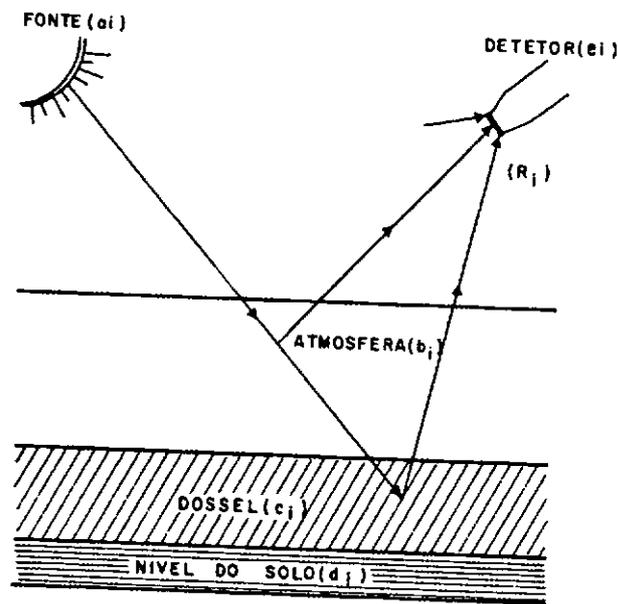


Fig. 21-Esquema do sistema completo de sensoriamento remoto

FONTE: Goel(1988)

A série de  $[R_i]$  atributos da REM recebida pelo detetor é dependente do comprimento de onda, tempo e detalhes espaciais introduzidos pela atmosfera, pelo dossel e pelo solo (Goel, 1988). Em geral:

$$R_i = f(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i) \quad (12)$$

A função  $f$  evoca o processo de transferência radiativa que produz a série  $[R_i]$ .

Goel(1988) considera que existem dois aspectos na relação acima, ou seja, entre a radiação detectada e os parâmetros sobre ela influentes, os quais são relevantes em sensoriamento remoto. Um aspecto envolve definir ou derivar uma função ou algoritmo que extrairá os valores da série  $[R_i]$ , dadas as características  $a_i, b_i, c_i, d_i$  e  $e_i$ . Este pode ser considerado o chamado "problema direto". O segundo aspecto envolve definir ou derivar uma função, relação ou algoritmo  $g$  que gerará os valores da série  $[c_i]$  dos parâmetros que caracterizam o dossel sobre o qual está sendo medida a série  $[R_i]$ . Simbolicamente  $g$  é especificada por :

$$[c_i] = g(R_i, a_i, b_i, d_i, e_i) \quad (13)$$

Este pode ser considerado o "problema inverso", ou o problema de estimar os parâmetros do dossel dada uma série de dados de Reflectância.

Usualmente a solução do "problema direto" é um pré-requisito para a solução do "problema inverso". Por isso os trabalhos iniciais nesta área do conhecimento foram dedicados na solução do "problema direto". Uma vez que o número de medidas de Reflectância é muito menor que o número de parâmetros que as determinam, o "problema inverso" é mais difícil de ser resolvido, embora obviamente de maior relevância prática. A Figura 22 mostra um esquema da representação de ambos os problemas e a estimativa de parâmetros do dossel a partir de dados de Reflectância.

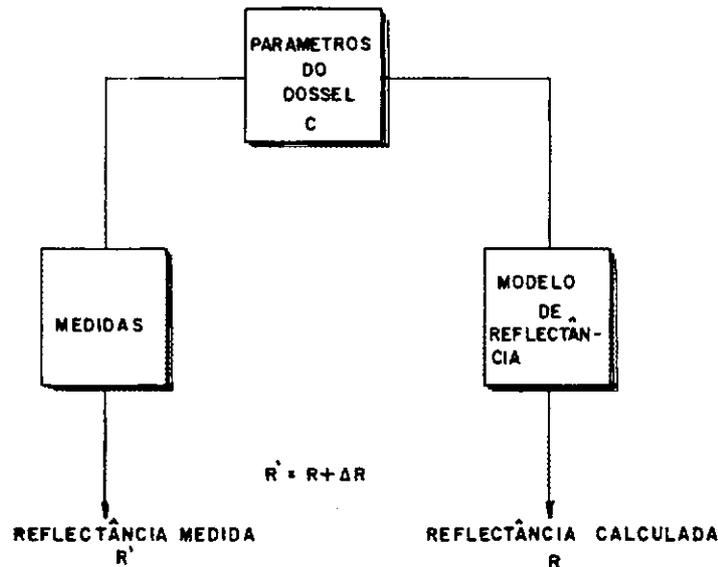


Fig. 22-Representação esquemática do "problema direto", do "problema inverso" e da estimativa dos parâmetros do dossel a partir de dados de reflectância.

FONTE: Goel(1988)

As abordagens consideradas na modelagem do regime de radiação de dosséis podem ser divididas em quatro categorias (Goel,1988):

1-Modelos geométricos: aqui o dossel é considerado uma superfície com propriedades reflexivas conhecidas e formada por objetos geométricos;

2-Modelos de meio turbido: nestes os elementos da vegetação são tratados como pequenas partículas que absorvem e espalham energia, com propriedades ópticas específicas, distribuídas aleatoriamente em camadas horizontais e orientadas em direções específicas;

3-Modelos híbridos : aqui o dossel é tratado como uma distribuição de plantas geometricamente formadas, com seus elementos tratados como partículas que absorvem e espalham energia. Estes modelos são de especial interesse quando os dosséis são esparsos;

4-Modelos de simulação computacional: nestes modelos o arranjo e orientação dos elementos da vegetação são simulados num computador. Considera-se cada um destes elementos dividido num número finito de áreas conhecidas. Um procedimento envolvendo a seleção de números aleatórios é usado para determinar se um dado raio de luz atingirá ou não uma destas áreas. Assim, a interceptação de raios pelos elementos da vegetação é analisada quase fóton por fóton.

Todos estes modelos são fundamentados em geometria ótica e na teoria de transferência radiativa.

O estudo da Reflectância de dosséis conduzido através de qualquer um destes modelos é uma tarefa difícil, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Kumar(1972) cita algumas destas variáveis, tais como:

.absorção da REM pelo oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água reduzindo a intensidade desta radiação em certos comprimentos de onda, o que muitas vezes implica na redução da exatidão de medições espectrorradiométricas;

a intensidade da fonte luminosa (geralmente o Sol) varia sob numerosas condições;

a Radiância provinda de plantas em condições de campo varia em função da geometria destas plantas, Reflectância do solo, etc;

a intensidade da REM solar apresenta um máximo próximo a  $0,5\mu\text{m}$ , decrescendo rapidamente tanto para comprimentos menores quanto para maiores a este valor.

Diante destas e de outras evidências, muitos autores têm comprovado através de experimentos que o conhecimento do comportamento espectral de folhas não é suficiente para explicar a Reflectância de dosséis, quando considerado isoladamente.

Myers et al.(1966), apud Kumar(1972), verificaram através de experimentos que uma das causas deste fato são as múltiplas reflexões que ocorrem no interior do dossel. Alguma quantidade de REM é espalhada entre as folhas, de forma que a Reflectância para todo o dossel é geralmente menor do que a Reflectância medida para uma única folha. A quantidade de espalhamento aumenta com a irregularidade da superfície foliar e com a elevação solar, porque a REM solar penetra mais no dossel quanto mais o Sol se aproxima da posição nadiral.

Serão apresentados, a seguir, alguns aspectos básicos para o entendimento da Reflectância da vegetação.

#### **4.2.2-BASES CONCEITUAIS PARA O ENTENDIMENTO DA REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO**

O fluxo radiante solar incidente sobre a vegetação é constituído de duas partes : pela fração de energia que não é absorvida ou espalhada pela atmosfera (também denominada fluxo especular) e pela fração que é espalhada (fluxo difuso). Esta última depende das condições atmosféricas (especialmente poeira e vapor d'água) e varia com o comprimento de onda. A direção do fluxo especular é caracterizada pelo ângulo zenital solar  $\theta_s$  (ângulo formado entre o raio luminoso e a normal local), enquanto que o fluxo difuso é caracterizado pela sua distribuição angular (Goel,1988).

A vegetação é constituída por diversos elementos, tais como folhas, galhos, frutos, flores, etc. O fluxo da REM incidente num destes elementos está sujeito a dois processos : espalhamento e absorção. A razão entre o fluxo espalhado e o fluxo total incidente é chamado de "albedo" do elemento. O processo de espalhamento em si pode ainda ser dividido em dois subprocessos: reflexão e transmissão. A título de exemplo, considerar-se-á uma folha como um destes elementos. O destino da radiação total incidente sobre uma folha depende de suas características (comprimento de onda, ângulo de incidência e da polarização) e das características da própria folha (propriedades da superfície, estrutura celular, composição, etc). Tucker e Garratt (1977) propuseram um modelo para quantificar esta dependência.

A energia refletida por uma folha é constituída de duas partes: a) energia refletida especularmente, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão e b) pela energia refletida difusamente. As quantidades relativas entre ambos os fluxos de energia (especular e

difuso) dependem das características da folha e do fluxo incidente. A variação direcional do fluxo difuso pode ser muito complexa (Goel, 1988).

Medidas das propriedades espectrais de folhas estão disponíveis para uma ampla gama de comprimentos de onda (Gates et al., 1965; Gausman e Allen, 1973; Gausman, 1985; apud Goel, 1988). Na seção 4.1 foram apresentados alguns aspectos relacionados ao comportamento espectral de folhas. A maioria dos trabalhos relacionados com folhas tem sido conduzida considerando a incidência normal da REM em hemisféreas integradoras que coletam toda a radiação provinda de ambos os lados da folha. Estas medidas se referem às chamadas Reflectância, Transmitância e Absortância Hemisféricas (ver item 2.3.2).

Em geral, a descrição da radiação espalhada por uma folha depende das direções de incidência e espalhamento. Poucas medidas têm sido feitas para permitir um perfeito entendimento dessa dependência. Breece e Holmes (1971) realizaram medições espectrais em folhas de milho e soja a ângulos de incidência de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Estas medições mostraram uma grande dependência da Reflectância para com o ângulo de incidência e os comprimentos de onda. Isso prova que o espalhamento da radiação não é isotrópico, ou seja, não é Lambertiano.

O movimento do fluxo solar incidente dentro do dossel em direção ao solo e o conseqüente fluxo de energia em direção ao sensor (Exitância), não dependem somente das propriedades de espalhamento e de absorção dos elementos da vegetação, mas também de suas densidades e orientações. Um elemento da vegetação, por exemplo, uma folha presente no interior do dossel, recebe dois tipos de radiação: aquela que não é interceptada pelos demais elementos e a radiação interceptada e espalhada por esses elementos. Assim, o sensor recebe vários tipos de fluxos :

- a) o fluxo espalhado somente uma vez por um elemento da vegetação (espalhamento único);
- b) o fluxo espalhado várias vezes por muitos elementos da vegetação (espalhamento múltiplo) sem ter atingido o solo;
- c) o fluxo refletido pelo solo que atinge o sensor sem ter sido interceptado por qualquer elemento ou, se interceptado por algum destes elementos, é espalhado em direção ao sensor.

Goel (1988) se refere à distribuição espacial dos elementos da vegetação, bem como a suas densidades e orientações, como a arquitetura da vegetação. A distribuição espacial depende do arranjo das sementes no plantio (no caso de vegetação cultivada), do tipo de vegetação existente e do estágio de desenvolvimento das plantas. Em vários modelos de Reflectância da vegetação, um dossel é considerado como sendo composto por vários sub-dosséis, arranjados regularmente no solo (plantios em fileiras, por exemplo) ou arranjados aleatoriamente, segundo uma distribuição específica. Para um dossel ou sub-dossel homogêneo, assume-se que a densidade dos elementos da vegetação é uniforme, o que é caracterizado pelo Índice de Área Foliar (IAF), que representa a razão entre a área do elemento e a área no terreno. O IAF é um dos principais parâmetros da vegetação e é requerido em modelos de crescimento vegetal e de evapotranspiração; ainda é relacionado à biomassa.

A Distribuição Angular Foliar (DAF) é caracterizada por uma função de densidade de distribuição  $f(\theta, \psi)$ , onde  $\theta$  e  $\psi$  são a inclinação e o azimute da folha, respectivamente. Por conseguinte,  $f(\theta, \psi) \delta\theta \delta\psi$  é a fração de área foliar sujeita aos ângulos de inclinação  $\theta$  e  $\theta + \delta\theta$ , e os ângulos azimutais  $\psi$  e  $\psi + \delta\psi$ . Goel (1988) menciona que, em muitos modelos de Reflectância da vegetação, essa fração é considerada azimutalmente simétrica e isso parece ser uma aproximação adequada para muitos tipos de vegetação. A DAF varia consideravelmente entre os tipos de vegetação. Os dosséis são normalmente descritos por um dos seguintes seis tipos de distribuições: planófila, erectófila, plagiófila, extremófila, uniforme e esférica. A Tabela 2

apresenta estas distribuições, acompanhadas dos valores médios e o segundo momento do ângulo de inclinação foliar  $\langle \theta \rangle$ .

Goel e Strebel(1984) mostraram que todas estas distribuições ideais, assim como muitas distribuições determinadas especificamente, são casos especiais de uma distribuição dita "universal" determinada pela distribuição Beta. Então :

$$f(\theta) = \frac{1}{(360)(90)} \frac{\Gamma(\mu+v)}{\Gamma(\mu)\Gamma(v)} [1-\theta/90]^{\mu-1} [\theta/90]^{v-1} \quad (14)$$

Onde é a função gama e os dois parâmetros  $\mu$  e  $v$  são relacionados ao Ângulo de Inclinação Foliar Médio (AIFM) e seu segundo momento  $\langle \theta \rangle$ ; ambos dados por :

$$\text{AIFM} = (90)v/(\mu+v) \quad (15)$$

$$\langle \theta \rangle = (90)v(v+1)/(\mu+v)(\mu+v+1) \quad (16)$$

Os valores de  $\mu$  e  $v$  correspondem aos seis tipos de distribuições apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição angular foliar  $f(\theta)$  para vários tipos de dosséis (Goel e Strebel,1984).

Tipo	$f(\theta)$	Média	$\langle \theta \rangle$	$\mu$ (*)	$v$ (*)
Planófila	$2(1+\cos^2 \theta)/\pi$	26,76	1058,60	2,770	1,172
Erectófila	$2(1-\cos^2 \theta)/\pi$	63,24	4341,40	1,172	2,770
Plagiófila	$2(1-\cos^4 \theta)/\pi$	45,00	2289,65	3,326	3,326
Extremófila	$2(1+\cos^4 \theta)/\pi$	45,00	3110,35	0,433	0,433
Uniforme	$2/\pi$	45,00	2700,00	1,000	1,000
Esférica	$\sin \theta$	57,30	3747,63	1,101	1,930

(\*) parâmetros da distribuição beta.

Estes parâmetros arquitetônicos afetam qualitativamente a Reflectância da vegetação. Na região do visível, uma vez que muito da energia incidente sobre uma folha é absorvido, com o aumento do número de folhas, isto é, com o aumento do IAF, mais energia será absorvida pela vegetação. Assim que o IAF atingir um determinado valor (aproximadamente compreendido entre 2 e 3), muito da radiação incidente é interceptado e absorvido pelas folhas e um permanente aumento do IAF não influenciará a Reflectância da vegetação. Por conseguinte, a Reflectância na região do visível decresce quase que exponencialmente com o aumento do IAF até atingir um valor próximo de 0, quando o IAF assume valores entre 2 e 3. Na região do infravermelho próximo, uma vez que a absorção é mínima, o aumento do IAF implica no aumento do espalhamento e no consequente aumento da Reflectância da vegetação, até que o IAF atinja valores compreendidos entre 6 e 8.

Um efeito da DAF sobre a Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB) foi apresentado por Norman et al.(1985) através de um exemplo muito simples de duas folhas planas dispostas num plano principal, assim como apresentado na Figura 23.

A folha 2, que está posicionada perpendicularmente a iluminação solar, é dita "bem iluminada", enquanto a folha 1, que se encontra posicionada quase que paralelamente aos raios luminosos, é dita "mal iluminada". O observador A, que tem o sol a suas costas, verá o brilho da cena sendo influenciado pelas reflectâncias da parte dorsal da folha 1 e da parte ventral da folha 2. O observador B verá melhor a folha "mal iluminada" (folha 1). Para ele a cena parecerá mais escura do que a vista pelo observador A. O brilho da cena, neste caso, é determinado pela transmitância da folha 1 e a reflectância da folha 2. A Reflectância especular de ambas as folhas não é observada em nenhuma das posições assumidas pelos observadores A e B.

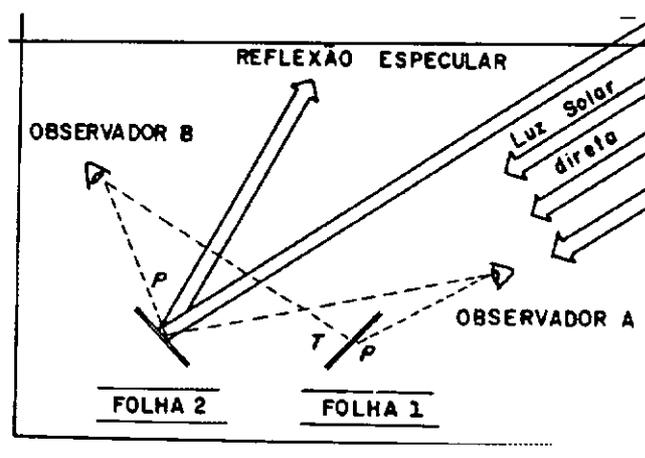


Fig. 23-A geometria do dossel e sua influência sobre a observação da FDRB.

FONTE: Norman et al.(1985)

Quando a fonte de iluminação é posicionada exatamente atrás do observador (ou sensor), será observada a maior proporção de componentes da vegetação iluminados diretamente. Sombras dentro da vegetação ou sobre a superfície do solo serão escondidas pela folhagem (ou pelas partículas do solo) que é iluminada. Por conseguinte, a Reflectância da vegetação tenderá a ser mais alta nesta situação. Este pico na Reflectância, quando a fonte luminosa encontra-se atrás do observador, é denominada de "hot spot" (Suits,1972). O dossel é composto por muitas folhas com uma ampla gama de inclinações e ângulos azimutais; por isso a magnitude do "hot spot" depende em geral da DAF. Desde que o sombreamento de uma folha causado por outra é dependente de seu tamanho, o efeito "hot spot" é também dependente desse tamanho (Goel,1988).

Existe outro efeito da DAF sobre a Reflectância da vegetação.A DAF influi na probabilidade de falhas através do dossel como uma função dos ângulos zenital solar e de visada, que determinam se os fluxos incidente e de exitância serão ou não interceptados pela vegetação. Por essa afirmação, conclui-se que a FDRB é fortemente dependente da DAF, sendo inclusive possível sua utilização para inferir sobre esta.

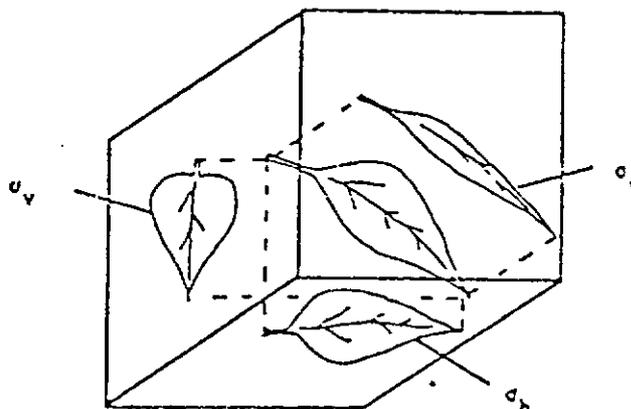
Kimes(1984), apud Goel(1988), apresentou uma excelente discussão sobre a relação entre a DAF e a FDRB. Dosséis compostos por folhas dispostas mais horizontalmente apresentam uma menor variabilidade na Reflectância em função dos ângulos zenitais solar e de visada, e apresentam as mais altas Reflectâncias para todas as distribuições. Para dosséis compostos por folhas dispostas eretamente, a Reflectância decresce com o aumento do ângulo zenital solar na região do visível enquanto aumenta na região do infravermelho próximo.

#### 4.2.3-O MODELO DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO PROPOSTO POR SUITS

Na maioria dos modelos propostos anteriormente ao de Suits, o cálculo da Reflectância era independente dos ângulos solar e de visada. Ainda estes modelos não relacionavam a Reflectância da vegetação aos parâmetros arquitetônicos e espectrais apresentados pelos seus elementos constituintes. No modelo proposto por Suits, o dossel é idealizado como uma mistura homogênea de painéis orientados horizontal e verticalmente, com um comportamento Lambertiano tanto na reflexão como na transmissão. Os elementos da vegetação são considerados como projeções horizontais e verticais, assim como mostrado na Figura 24.

Neste modelo várias pressuposições são consideradas as quais têm sido questionadas e solucionadas por vários autores. As principais delas se referem a Reflectância e a Transmitância de ambos os lados da folha, que são consideradas iguais, ao posicionamento ora vertical, ora horizontal das folhas, além de outros. Chance e Cantu (1975),apud Goel(1988)

estenderam o modelo no sentido de permitir um número arbitrário de camadas no dossel. Bunnik e Verhoef(1974), apud Goel(1988), foram os autores que mais extensões promoveram ao modelo de Suits. Eles tornaram o modelo mais aplicável sob condições reais, incluindo a distribuição angular das folhas como um dos principais aprimoramentos. O modelo passou a ser chamado de SAIL ("Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves") e tem sido avaliado por diversos autores. É o caso de Goel e Thompson(1984b) que usaram dados de Reflectância Bidirecional referentes a região do infravermelho próximo, para um dossel homogêneo de soja, para 12 direções solares, na avaliação do SAIL. O modelo foi considerado bom quando houve similaridade entre os parâmetros estimados pelo modelo e aqueles medidos, e ainda, quando para estes valores estimados as Reflectâncias calculadas estiveram próximas das medidas.



$\sigma_v$  = área média da projeção do elemento (no caso uma folha) no plano horizontal;  
 $\sigma_h$  = área média da projeção do elemento em dois planos ortogonais, verticalmente posicionados.

Fig. 24-As projeções horizontal e vertical de uma folha usadas no modelo de Suits.

FONTE: Goel(1988)

Goel e Deering (1985) também avaliaram o modelo SAIL, considerando medidas de dosséis de grama e soja. Goel (1988) cita ainda inúmeros trabalhos voltados para a avaliação deste modelo, assim como daquele proposto por Suits e a conclusão geral dos autores foi que o modelo SAIL é um modelo mais realístico do que o de Suits.

#### 4.2.3.1-DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo em questão calcula a Reflectância Bidirecional de um dossel levando-se em consideração as propriedades espectrais e geométricas dos elementos identificáveis deste dossel. Este modelo considera ainda que o dossel é constituído por um número finito de camadas horizontais, sendo que em cada uma destas camadas, cada elemento constituinte do dossel está aleatoriamente distribuído e todos estão homoganeamente misturados. A Figura 25 ilustra esta geometria descrita.

Muitos dosséis vegetativos têm uma estrutura diferente desta apresentada. Trigo, por exemplo, produz os grãos na camada superior do dossel, enquanto os colmos e folhas ocupam a camada secundária. Florestas freqüentemente exibem uma estrutura na qual os componentes de diferentes espécies ocupam diferentes camadas. A ordem e o conteúdo destas camadas afetam a Reflectância direcional do dossel. A camada inferior é sempre margeada pelo solo em qualquer dos dosséis considerados.

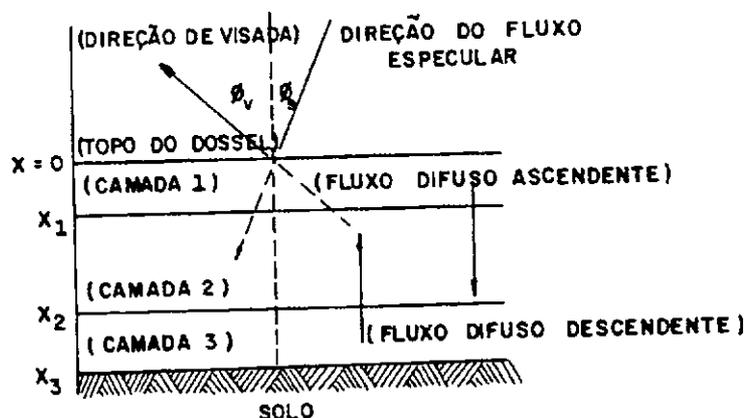


Fig. 25-Esquema representativo de um modelo considerando três camadas.

FONTE: Suits(1972)

Cada elemento constituinte de um dossel, assim como folhas, galhos, etc; é idealizado como uma combinação de painéis planos orientados vertical e horizontalmente que transmitem e refletem difusamente a REM. O tamanho e propriedades espectrais destes painéis são obtidos através das medidas físicas. Em geral o objetivo é determinar o tamanho ou grandeza física dos painéis que interceptariam a mesma quantidade de Fluxo Radiante. As projeções de um elemento nos planos vertical e horizontal definem áreas destes painéis que atendem este critério, da mesma forma que fornece uma simplicidade geométrica ao modelo. Estas projeções estão representadas na Figura 24. As medidas referentes à Reflectância e Transmitância Espectrais de cada elemento considerado são feitas em laboratório e os resultados são considerados para todos os painéis relativos a cada elemento dentro do âmbito do modelo. Se as plantas constituintes de um dossel forem estressadas por alguma condição ambiental ou patógeno, as mudanças na geometria dos elementos constituintes destas plantas implicará em alterações nas dimensões ou grandezas dos painéis considerados no modelo. Um exemplo clássico deste fenômeno é o estresse causado pela falta de umidade, que causa, geralmente, o murchamento das folhas e a conseqüente verticalização destas. Assim sendo, os componentes verticais do modelo aumentam em área seguido de um decréscimo em área dos componentes horizontais. Se todos os demais fatores que governam a Reflectância do dossel forem considerados constantes, a alteração detectada no cálculo desta Reflectância deve-se exclusivamente as alterações geométricas mencionadas.

Assim como descrito em capítulos anteriores, o Fluxo Radiante que interage com o dossel é dividido em dois tipos: especular e difuso. O fluxo especular é aquele que chega de uma parte do céu ou Sol e flui através do dossel segundo uma linha reta sem interceptar qualquer elemento constituinte do dossel ou do solo. O fluxo difuso é aquele que pode ser interceptado por qualquer um destes elementos, inclusive o solo. Cada um destes fluxos será representado doravante por  $E_{\lambda}(s)$  e  $E_{\lambda}(d)$ , sendo o primeiro designado para o fluxo especular e o segundo para o difuso. O fluxo difuso pode ainda ser dividido em dois outros fluxos, segundo a direção de propagação, que pode ser em direção ao solo (descendente [-]), ou em direção ao sensor (ascendente [+]). Estes fluxos difusos são representados por  $E_{\lambda}(-d)$  e  $E_{\lambda}(+d)$ . Desde que o dossel é constituído por diferentes camadas, cada uma destas com propriedades particulares, nesta nomenclatura deve ser incluída a especificação da camada. Assim, por exemplo,  $E_{\lambda}(+d,i,x)$  representa o fluxo difuso ascendente na camada  $i$  no nível  $x$ . O cálculo para determinar  $E_{\lambda}(+d,i,x)$  em cada camada é feito segundo as seguintes equações:

$$\delta E(+d,i,x)/\delta x = -a_i E_{\lambda}(+d,i,x) + b_i E_{\lambda}(-d,i,x) + c_i E_{\lambda}(s,i,x) \quad (17)$$

$$\delta E(-d,i,x)/\delta x = a_i E_{\lambda}(-d,i,x) - b_i E_{\lambda}(+d,i,x) - c_i E_{\lambda}(s,i,x) \quad (18)$$

$$\delta E(s,i,x)/\delta x = k_i E_{\lambda}(s,i,x) \quad (19)$$

As constantes  $a_i, b_i, c_i, c'_i$  e  $k_i$  são derivadas de medidas dos componentes do dossel na  $i$ -ésima camada; então:

$$a_i = [\sigma_h n_h (1-\tau) + \sigma_v n_v (1-(\rho+\tau)/2)] \quad (20)$$

$$b_i = [\sigma_h n_h + \sigma_v n_v (\rho/2 + \tau/2)] \quad (21)$$

$$c_i = [\sigma_h n_h \rho + (2/\pi) \sigma_v n_v (\rho/2 + \tau/2) \tan\theta] \quad (22)$$

$$c'_i = [\sigma_h n_h \tau + (2/\pi) \sigma_v n_v (\rho/2 + \tau/2) \tan\theta] \quad (23)$$

$$k_i = [\sigma_h n_h + (2/\pi) \sigma_v n_v \tan\theta] \quad (24)$$

Onde  $\sigma_h$  é a área média da projeção do elemento constituinte do dossel no plano horizontal e  $\sigma_v$  é a área média deste mesmo elemento nos dois planos ortogonais verticais (vide Figura 24);  $n_h$  é o número de projeções horizontais por unidade de volume e  $n_v$  é o número de projeções verticais por unidade de volume. O ângulo  $\theta$  é o ângulo polar do fluxo especular incidente.

A Reflectância e a Transmitância Espectrais ( $\rho$  e  $\tau$ ), são valores hemisféricos obtidos através de medições em laboratório. O fator  $2/\pi$  associado com a tangente do ângulo especular nas equações (21), (22) e (23) é o valor médio do cosseno do ângulo azimutal. As projeções verticais são mediadas por orientações azimutais aleatórias.

Se mais do que um tipo de elemento existe numa camada do dossel, então os valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $c'$  e  $k$  são obtidos para cada um destes separadamente e adicionados de forma a obter-se um único valor para a camada em questão. Por exemplo, considerando três tipos de elementos constituintes para a  $i$ -ésima camada, o cálculo de  $a_i$  seria:

$$a_i = a_i(\text{tipo1}) + a_i(\text{tipo2}) + a_i(\text{tipo3}) \quad (25)$$

As soluções das equações (17), (18) e (19) se procedem da seguinte forma:

$$E_{\lambda}(+d, i, x) = A_i(1-f_i) \exp(g_i x) + B_i(1+f_i) \exp(-g_i x) + C_i \exp(k_i x) \quad (26)$$

$$E_{\lambda}(-d, i, x) = A_i(1+f_i) \exp(g_i x) + B_i(1-f_i) \exp(-g_i x) + D_i \exp(k_i x) \quad (27)$$

$$E_{\lambda}(s, i, x) = E_{\lambda}(s, i-1, x_{i-1}) \exp(k_i x) \quad (28)$$

Onde  $A_i$  e  $B_i$  são determinados para condições de contorno;  $C_i$ ,  $D_i$ ,  $g_i$  e  $f_i$  são determinados por substituição das equações (26) e (27) nas equações (17) e (18). Destas substituições resultam:

$$C_i = [(c_i(k_i - a_i) - c'_i b_i) / (k_i^2 - a_i^2)] E(s, i-1, x_{i-1}) \quad (29)$$

$$D_i = [(c'_i(k_i + a_i) + c_i b_i) / (k_i^2 - a_i^2)] E(s, i-1, x_{i-1}) \quad (30)$$

$$g_i = (a_i^2 - b_i^2)^{1/2} \quad (31)$$

$$f_i = [(a_i - b_i) / (a_i + b_i)]^{1/2} \quad (32)$$

A quantidade  $E_{\lambda}(s, i-1, x_{i-1})$  é o valor da Irradiância especular no fundo da  $(i-1)$ -ésima camada.

As condições de contorno requerem que no topo da primeira camada ( $x=0$ ) o único fluxo existente seja o especular,  $E_{\lambda}(s, 1, x=0)$ . Por conseguinte, o fluxo difuso descendente é zero neste limite; assim:

$$E_{\lambda}(-d, 1, x=0) = 0 \quad (33)$$

As condições de contorno entre camadas requerem que o fluxo de REM em ambas as direções (descendente e ascendente) através dos limites de cada camada seja contínuo. No nível do solo, estas condições requerem que todo o fluxo direto descendente seja refletido integralmente pelo solo, produzindo então um fluxo também direto, mas difuso e direcionado ascendente. Os fluxos especular e difuso dentro do dossel tornam-se então determináveis. As condições de contorno para uma só camada fica, portanto:

$$E_{\lambda}(-d,1,0)=0 \quad (34)$$

$$E_{\lambda}(+d,1,x1)= (\text{solo})[E_{\lambda}(-d,1,x1)+E_{\lambda}(s,1,x1)] \quad (35)$$

Estas relações são solucionadas para A1 e B1. Fica claro, portanto, que a Reflectância do solo entra na avaliação destas constantes na medida em que haja um fluxo de REM descendente e atinja o solo. Contudo, para dosséis muito densos e opacos, as características reflexivas do solo tornam-se desprezíveis e não influentes na Reflectância do dossel.

## 5-CONSIDERAÇÕES FINAIS

O perfeito entendimento dos fenômenos e parâmetros envolvidos na interação da REM com a vegetação está longe de ser trivial. Conclusões seguras sobre estes só são conseguidas a custo de muito trabalho, esmero, paciência e equipamentos adequados. Antes de qualquer definição de técnicas e/ou procedimentos a serem utilizados visando a determinação do comportamento espectral (ou simplesmente, da Reflectância) de alvos vegetais (folhas isoladas, uma planta ou conjunto de plantas), os objetivos da investigação devem estar profundamente definidos, pois são eles que, em última análise, estabelecerão as potencialidades e limitações destas técnicas e procedimentos.

No campo da modelagem, existem ainda inúmeras lacunas, quer seja no que se refere ao conhecimento da interação mencionada, como também nos procedimentos adotados na coleta de parâmetros biofísicos e espectrais. Sobre os primeiros algumas técnicas já desenvolvidas não contemplam uma variedade muito grande de tipologias vegetais (tamanho e forma de folhas) e, sobre os parâmetros espectrais, as limitações verificam-se principalmente na disponibilidade de equipamento adequado, tanto para a caracterização, em condições de laboratório, das propriedades espectrais de elementos da vegetação (folhas, galhos, etc.), como também na coleta de dados espectrorradiométricos em nível de campo.

No Brasil, estas lacunas e limitações se ampliam devido a falta de investimento financeiro, aliado ao ainda pequeno número de pesquisadores envolvidos em experimentos dessa natureza. A maioria dos poucos trabalhos versando sobre o assunto estão ainda em fase preliminar, destacando-se aqueles desenvolvidos pelos pesquisadores da Divisão de Sensoriamento Remoto e Meteorologia Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSM/INPE).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, W.A.; Richardson, A.J. Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, 58:1023 -1028, 1968.
- Breece, I., H.T.; Holmes, R.A. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves "in vivo". *Applied Optics*. 10(1):119-127, 1971.
- Esau, K. *Plant anatomy*. 2.ed. New York. John Wiley. 1965, 480p.
- Gates, D.M.; Keegan, H.J.; Schleter, J.C.; Weidner, V.R. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4(1): 11-20, 1965.
- Gausman, H.W. ; Allen, W.A.; Myers, V.I. ; Cardenas, R. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L., *Agronomy Journal*, 61:374-376, 1969.
- Goel, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4: 1-21, 1988.
- Knipling, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1:155-159, 1970.
- Kumar, R. Radiation from plants-reflection and emission: a review. Lafayette. Purdue Research Foundation, 1974, 88p. (Research Project n:5543).
- Melamed, N.T. Optical properties of powders Part I. Optical absorption coefficients and the absolute value of the diffuse reflectance Part II. Properties of luminescent powders. *Journal of Applied Physics*, 34:560-570, 1963.
- Myers, V.I.; Allen, W.A. Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. *Applied Optics*, 7: 1819-1838, 1968.
- Novo, E.M, de M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. São Paulo. Edgard Blucher. 1989. 308p.
- Smith, J.A. Matter-Energy interaction in the optical region. In: *Manual of remote sensing*. Falls Church. ASP. 1983, p.61-113.
- Suits, G.H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2: 117-125, 1972.
- Suits, G.H. The Nature of electromagnetic radiation. In: *Manual of remote sensing*. Falls Church. ASP. 1983, p.37-60.
- Swain, P.H.; Davis, S.M. *Remote sensing: a quantitative approach*. Lafayette, McGraw-Hill. 1978.