

Sensoriamento Remoto

Texto - Cópias

**Sensoriamento Remoto do Ambiente:
Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**

Tradução da Segunda Edição

John R. Jensen

University of South Carolina

TRADUÇÃO:

JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO (Coordenador) - INPE

ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO - INPE

ATHOS RIBEIRO DOS SANTOS - INPE

BERNARDO FRIEDRICH THEODOR RUDORFF - INPE

CLÁUDIA MARIA DE ALMEIDA - INPE

LÊNIO SOARES GALVÃO - INPE

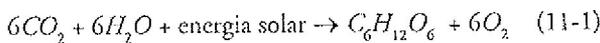


São José dos Campos, SP, Brasil
2009

www.parentese.com.br

indiretamente, não é somente o principal meio de permitir o funcionamento normal da sociedade civilizada, mas também o único meio de manter a vida – exceto para o caso de algumas poucas bactérias que extraem sua energia de sais sulfurados e de outros compostos inorgânicos. Este singular processo de fabricação fotossintética das plantas verdes fornece matéria bruta, energia e oxigênio. Na fotossíntese, a energia do Sol é aproveitada e acumulada em moléculas simples de açúcar feitas a partir de água e de dióxido de carbono (CO_2) com o auxílio da clorofila. O oxigênio é gerado como subproduto do processo.

O naturalista Joseph Priestly descobriu em 1772 que, ao colocar uma vela sob uma redoma de cristal ela se apagava rapidamente, muito antes de consumir toda a cera. Também observou que um rato morria se deixado sob o mesmo recipiente. Ele acreditava que o ar ficava *danificado* pela vela e pelo rato, mas que poderia ser restaurado pela colocação de uma planta sob a redoma. Jan Ingen-Housz continuou os experimentos de Priestly e descobriu em 1788 que a influência da luz solar sobre a planta poderia causar o salvamento do rato em poucas horas. Em 1796 o pastor francês Jean Senebier descobriu que o ar danificado na redoma era o dióxido de carbono (CO_2), o qual era absorvido pelas plantas. Finalmente, Theodore de Saussure demonstrou que o aumento na massa da planta à medida em que ela cresce era devido não somente à absorção de CO_2 , mas também de água (H_2O). No início do século vinte, cientistas descobriram que o oxigênio da fotossíntese provinha da água. De fato, a energia da luz ao entrar na planta quebra a água em oxigênio e hidrogênio. O processo fotossintético é descrito pela equação:



A *fotossíntese* é um processo de armazenamento de energia que ocorre em folhas e em outras partes verdes das plantas na presença de luz. A energia luminosa é armazenada numa molécula de açúcar simples (glucose), que é produzida a partir do dióxido de carbono (CO_2) existente no ar, e da água (H_2O) absorvida pela planta, principalmente por meio do sistema radicular. Quando o dióxido de carbono e a água são combinados e formam a molécula de açúcar ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) em um cloroplasto, o gás oxigênio (O_2) é liberado como um subproduto. O oxigênio difunde-se na atmosfera. O processo fotossintético começa quando a luz solar atinge os *cloroplastos*, pequenos corpos existentes nas folhas, os quais contêm uma substância verde chamada clorofila.

As plantas adaptaram sua estrutura interna e externa para realizar a fotossíntese. Esta estrutura e suas interações com a energia eletromagnética têm um impacto direto na forma como as folhas e os dosséis vegetais aparecem espectralmente quando registrados usando instrumentos de sensoriamento remoto.



Características Espectrais da Vegetação

Uma folha verde sadia intercepta o fluxo radiante incidente (Φ) direto proveniente do Sol ou da radiação difusa espalhada sobre a folha. Esta energia eletromagnética interage com os pigmentos, água e espaços intercelulares internos à folha vegetal. A quantidade de fluxo radiante refletido da folha (Φ_ρ), a quantidade de fluxo radiante absorvido pela folha (Φ_α) e a quantidade de fluxo radiante transmitido através da folha (Φ_τ) podem ser cuidadosamente medidos se aplicarmos a equação do balanço de energia e continuarmos acompanhando o que acontece com toda a energia incidente. A equação geral para a interação do fluxo radiante *espectral* (λ) sobre e dentro da folha é:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{\rho_\lambda} + \Phi_{\alpha_\lambda} + \Phi_{\tau_\lambda} \quad (11-2)$$

Dividindo cada uma das variáveis pelo fluxo radiante incidente original, Φ_λ :

$$\frac{\Phi_\lambda}{\Phi_\lambda} = \frac{\Phi_{\rho_\lambda}}{\Phi_\lambda} + \frac{\Phi_{\alpha_\lambda}}{\Phi_\lambda} + \frac{\Phi_{\tau_\lambda}}{\Phi_\lambda} \quad (11-3)$$

Obtém-se:

$$i_\lambda = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \quad (11-4)$$

onde ρ_λ é a reflectância hemisférica espectral da folha, α_λ é a absorptância hemisférica espectral e τ_λ é a transmitância hemisférica espectral pela folha. Muitos sistemas de sensoriamento remoto funcionam na região de 0,35 a 3,0 μm medindo principalmente a energia refletida. Portanto, é também útil a relação

$$\rho_\lambda = i_\lambda - (\alpha_\lambda + \tau_\lambda) \quad (11-5)$$

onde a energia refletida da superfície foliar da planta é igual à energia incidente menos a energia absorvida diretamente para a fotossíntese ou para outros processos e a quantidade de energia transmitida diretamente através da folha em direção a outras folhas ou ao substrato debaixo do dossel.

Principais Fatores que Controlam a Reflectância Foliar

Trabalhos pioneiros de Gates et al. (1965), Gausmann et al. (1969), Myers (1970) e outros demonstraram a importância do entendimento sobre como os pigmentos foliares, os espalhamentos internos e o conteúdo interno de umidade afetam as propriedades de reflectância e de transmitância das folhas (Peterson e Running, 1989). Os fatores

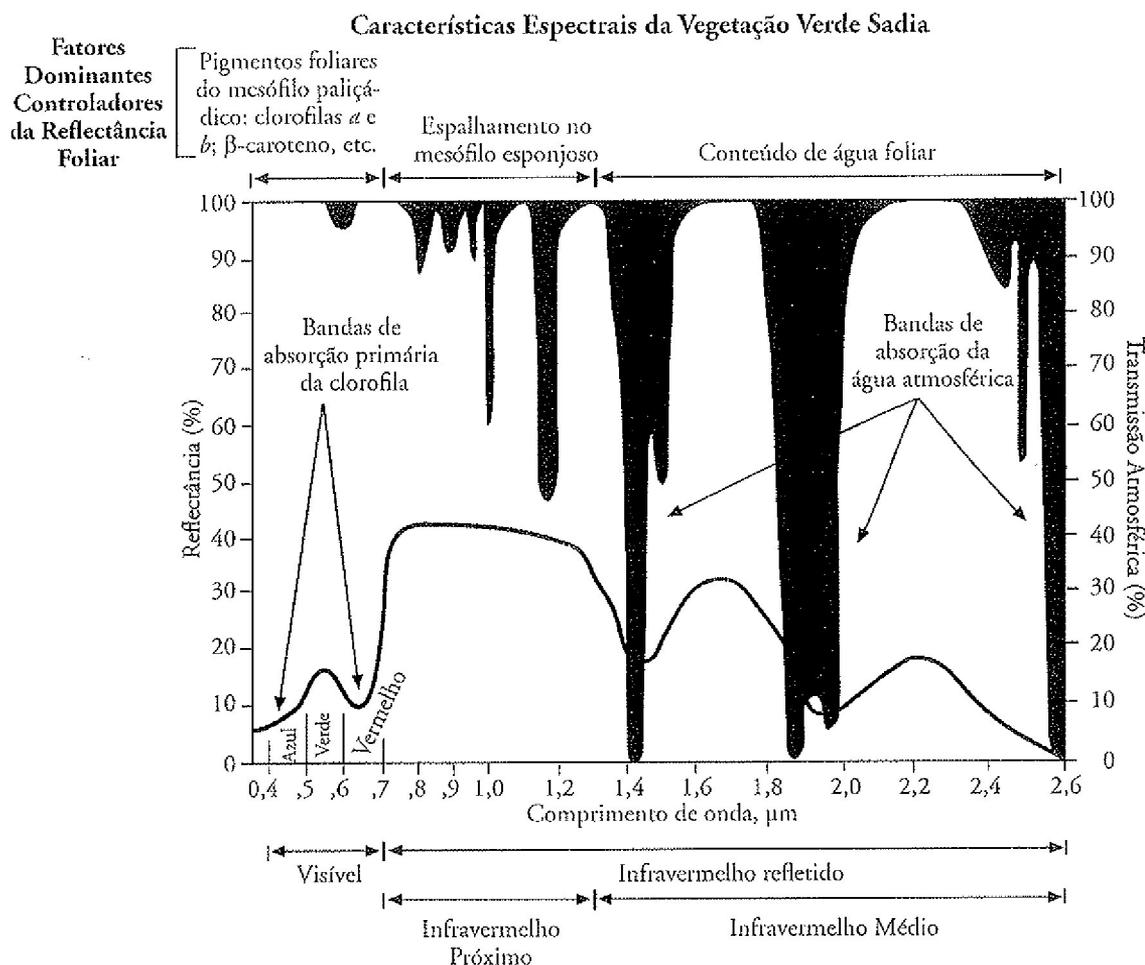


Figura 11-1 Reflectância espectral característica da folha vegetal verde sadia, para o intervalo de comprimentos de onda entre 0,4 e 2,6 μm. Os fatores dominantes que controlam a reflectância foliar são os vários pigmentos foliares existentes no mesófilo paliçádico (por exemplo, as clorofilas *a* e *b*, e o β-caroteno), o espalhamento da energia infravermelha no mesófilo esponjoso e a quantidade de umidade na planta. As principais bandas de absorção pela clorofila ocorrem em 0,43 – 0,45 μm e em 0,65 – 0,66 μm na região do visível. As principais bandas de absorção pela água ocorrem em 0,97; 1,19; 1,45; 1,94 e 2,7 μm.

dominantes que controlam a reflectância foliar na região entre 0,35 e 2,6 μm estão sumarizados na Figura 11-1.

Interação da Luz Visível com os Pigmentos nas Células do Mesófilo Paliçádico

O processo de geração de alimento via fotossíntese determina como uma folha ou um dossel vegetal de fato aparecem radiometricamente em imagens de sensoriamento remoto. Uma folha sadia necessita de três coisas para gerar alimento:

- dióxido de carbono (CO₂)
- água (H₂O)
- irradiância (E_λ) medida em W m⁻².

O dióxido de carbono do ar e a água fornecida através das raízes representam as matérias-primas fundamentais da fotossíntese. A luz solar provê a irradiância (E_λ) que fornece a energia para a fotossíntese.

A folha é o órgão fotossintetizante por excelência. Um corte transversal de uma folha verde típica é mostrado na Figura 11-2. A estrutura celular das folhas é bastante variável, dependendo da espécie e das condições ambientais durante o crescimento. O dióxido de carbono entra na folha, proveniente da atmosfera, através de minúsculos poros chamados estômatos, os quais estão localizados principalmente na *epiderme inferior*. Cada estômato é circundado pelas *células-guardas* que se incham ou se contraem. Quando elas incham, os poros dos estômatos abrem-se e permitem que o dióxido de carbono entre na folha. Uma folha de girassol típica possui cerca de

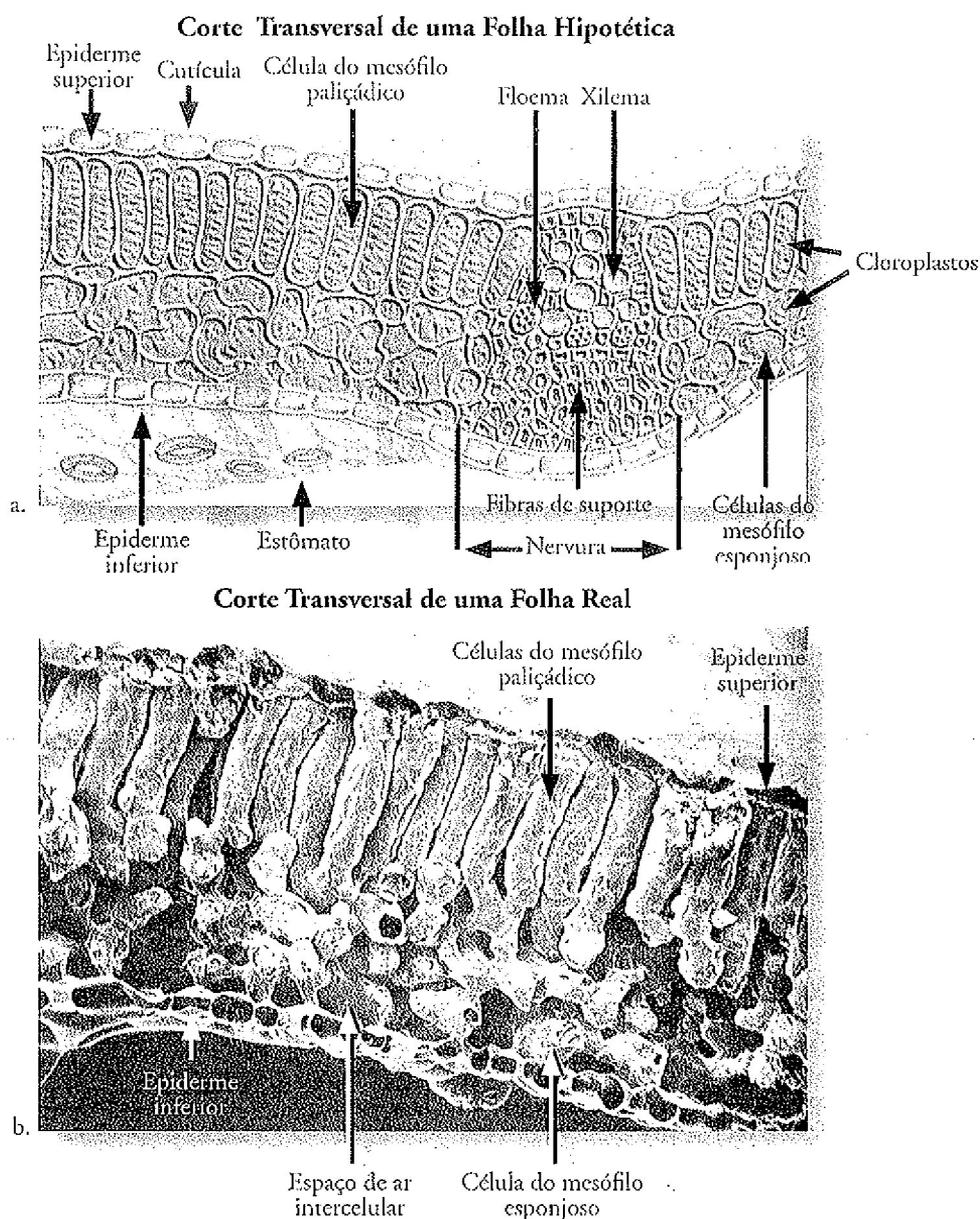


Figura 11-2 a) Seção transversal de uma folha verde típica hipotética, mostrando tanto o topo como a parte inferior da folha. Os pigmentos foliares nas células do parênquima paliçádico têm um impacto significativo na absorção e na reflectância da luz visível (azul, verde e vermelho), enquanto que as células do mesófilo esponjoso têm um impacto significativo na absorção e na reflectância da energia infravermelha incidente; b) Imagem de microscópio eletrônico de uma folha verde.

2 milhões de estômatos, mas eles perfazem apenas um por cento da superfície foliar. Usualmente, há mais estômatos na parte inferior da folha; entretanto, em algumas folhas os estômatos podem estar equilibradamente distribuídos tanto na epiderme inferior quanto na epiderme superior.

As células da camada externa da *epiderme superior* possuem uma superfície *cuticular* que difunde mas reflete muito

pouca luz (Philpott, 1971). A espessura desta superfície é variável (aproximadamente 3 – 5 μm), sendo que as dimensões das células giram em torno de 18 x 15 x 20 μm . Trata-se de um material graxo e translúcido similar à cutícula das unhas dos dedos humanos. As folhas de muitas plantas de ambientes claros possuem uma fina cutícula que pode filtrar parte da luz e proteger contra excessivas perdas de umidade. Por outro lado, algumas plantas como

samambaias e alguns arbustos em sub-bosques de florestas precisam sobreviver em condições sombreadas. As folhas de muitas destas plantas apresentam uma cutícula mais fina, de tal forma que a planta possa coletar tanto quanto possível a luz difusa que ali chega para a fotossíntese.

Muitas folhas sob luz solar direta apresentam pêlos tanto na epiderme superior como na inferior, tornando-as difusas. Esses pêlos podem ser benéficos, pois reduzem a intensidade da luz solar direta na planta. Não obstante, grande parte da energia visível e infravermelha é transmitida através da cutícula e da epiderme superior chegando às células do mesófilo do parênquima paliçádico e do mesófilo do parênquima lacunoso, abaixo.

A fotossíntese ocorre dentro da folha verde típica em dois tipos de células produtoras de alimentos – as células do mesófilo dos *parênquimas paliçádico* e *lacunoso*. Muitas folhas apresentam uma camada distinta de células longas do parênquima paliçádico na parte superior do mesófilo, ao passo que, no mesófilo inferior (ou parênquima lacunoso), as células são mais irregulares e folgadoamente dispostas. As células paliçádicas tendem a se formar na porção do mesófilo mais próximo do lado por onde a luz entra na folha. Em várias folhas horizontais (também chamadas *planófilas*), as células paliçádicas estarão na porção superior, mas em folhas mais verticais (as *erectófilas*), as células paliçádicas podem formar-se em ambos os lados. Em algumas folhas as células paliçádicas alongadas estão inteiramente ausentes e somente as células do parênquima lacunoso existirão dentro do mesófilo.

A estrutura celular da folha é grande em relação aos comprimentos de onda da luz que interage com ela. As células paliçádicas têm tipicamente $15 \times 15 \times 60 \mu\text{m}$, enquanto que as do parênquima lacunoso são menores. As células vegetais do parênquima lacunoso do mesófilo contêm cloroplastos com pigmentos de clorofila.

Geralmente os cloroplastos têm $5 - 8 \mu\text{m}$ de diâmetro e cerca de $1 \mu\text{m}$ de espessura. Em média 50 cloroplastos podem estar presentes em cada célula. Dentro dos cloroplastos estão os longos e delgados filamentos dos *grana* (não mostrados), no interior dos quais a clorofila (aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$ de comprimento por $0,05 \mu\text{m}$ de diâmetro) está localizada. Geralmente os cloroplastos são mais abundantes na parte superior da folha, nas células paliçádicas, o que explica a aparência verde mais escura da superfície superior da folha quando comparada com a superfície inferior, mais clara.

Quando atingida por uma onda ou fóton de luz, uma molécula reflete parte da energia ou pode absorvê-la, e assim ficar num estado de maior energia ou excitada (conforme o Capítulo 2). Cada molécula absorve ou reflete seus comprimentos de onda luminosos específicos. As moléculas de

uma planta verde típica que absorvem preferencialmente comprimentos de onda da região espectral do visível ($0,35 - 0,70 \mu\text{m}$) são denominadas *pigmentos*. Um *espectro de absorção* para um pigmento específico descreve os comprimentos de onda nos quais este pigmento pode absorver luz e entrar em estado de excitação. A Figura 11-3a apresenta o espectro de absorção de pigmentos puros de clorofila em solução. A clorofila *a* e a clorofila *b* são os mais importantes pigmentos vegetais absorvedores da luz azul e luz vermelha: a clorofila *a* nos comprimentos de onda $0,43$ e $0,66 \mu\text{m}$, e a clorofila *b* nos comprimentos de onda $0,45$ e $0,65 \mu\text{m}$ (Farabee, 1997). Uma relativa diminuição de absorção entre as duas citadas bandas de absorção produz um decréscimo na eficiência de absorção em aproximadamente $0,54 \mu\text{m}$, na porção verde do espectro eletromagnético (Figura 11-3a). Dessa forma, é a menor absorção da luz verde (em comparação com a da luz azul e com a da luz vermelha) que faz com que as folhas verdes saudáveis pareçam verdes aos nossos olhos.

Há outros pigmentos presentes nas células do mesófilo paliçádico, os quais ficam normalmente mascarados pela maior abundância das clorofilas. Por exemplo, há os *carotenos* amarelos e as *xantofilas* amarelo-claras, que absorvem principalmente na região do azul. Espectros de absorção do β -caroteno são mostrados na Figura 11-3b, destacando-se uma forte banda de absorção centrada em $0,45 \mu\text{m}$. Os pigmentos *sicoeritrina* podem também estar presentes nas folhas, e absorvem predominantemente na região centrada no verde (aproximadamente em $0,55 \mu\text{m}$) permitindo que a luz azul e a vermelha sejam refletidas. A *ficocianina* absorve principalmente nas regiões do verde e do vermelho centradas em $0,62 \mu\text{m}$, permitindo que grande parte do azul e uma parte da luz verde (ou seja, combinando estas duas cores gera-se a cor ciano) sejam refletidas. (Figura 11-3b). Dado que as clorofilas *a* e *b* também estão presentes e têm bandas de absorção similares nesta região do azul, elas tendem a dominar e mascaram o efeito dos outros pigmentos presentes. Quando uma planta atinge a senescência ou é afetada por estresse, os pigmentos de clorofila podem desaparecer, permitindo que os carotenos e outros pigmentos tornem-se dominantes. Por exemplo, no outono, cessa a produção de clorofila, fazendo com que a coloração amarela dos carotenos e de outros pigmentos específicos na folhagem arbórea tornem-se mais visíveis aos nossos olhos. Além disso, algumas árvores produzem grandes quantidades de *antocianina* no outono, fazendo com que suas folhas fiquem vermelho-brilhantes.

As duas regiões espectrais ótimas para observar as características de absorção da clorofila de uma folha são localizadas em $0,45 - 0,52 \mu\text{m}$ e em $0,63 - 0,69 \mu\text{m}$ (Figura 11-3a). A primeira delas é caracterizada por uma forte absorção causada pelos carotenóides e pelas clorofilas, enquanto que a outra é caracterizada por forte absorção da clorofila.

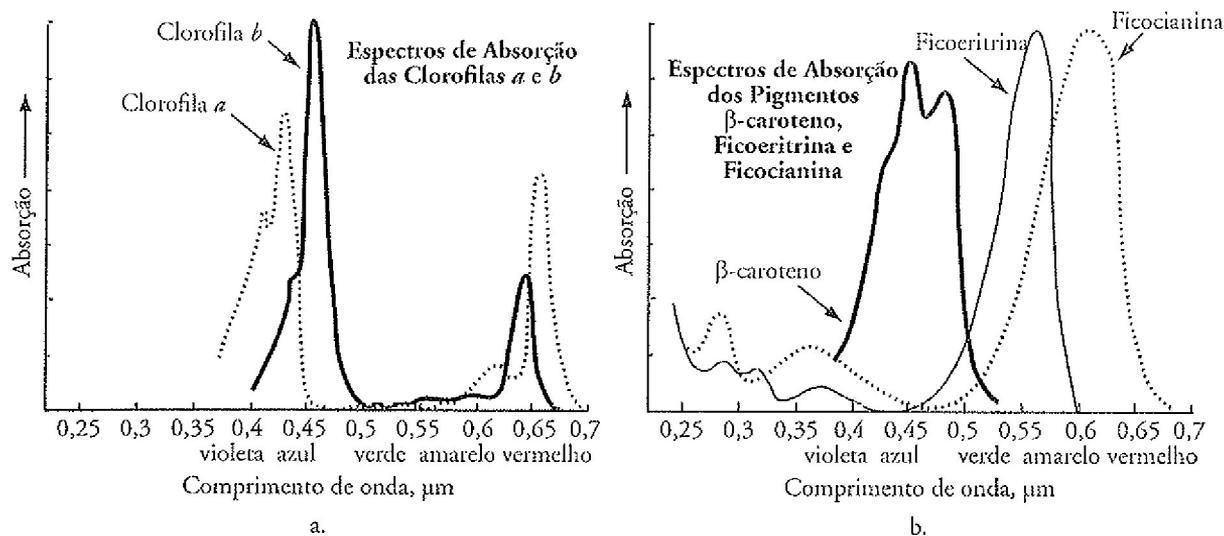


Figura 11-3 a) Espectros de absorção dos pigmentos clorofila *a* e clorofila *b*. As clorofilas *a* e *b* da folha vegetal absorvem grande parte da energia azul e da vermelha incidentes. b) Espectros de absorção do β -caroteno, que absorve principalmente no azul. Outros pigmentos encontráveis nas folhas vegetais incluem a ficoeritrina, que absorve preferencialmente a luz verde, e a ficocianina, que absorve principalmente a luz verde e a luz vermelha (conforme Farabee, 1997).

O sensoriamento remoto da absorção por clorofila num dossel vegetal representa uma variável biofísica fundamental útil para vários tipos de pesquisas biogeográficas. As características de absorção dos dosséis vegetais podem ser associadas a outros dados de sensoriamento remoto para identificar estresse, produtividade e outras variáveis híbridas da vegetação. Desta forma, muitos estudos de sensoriamento remoto estão focalizados no monitoramento do que acontece com a *radiação fotossinteticamente ativa* (PAR) quando ela interage com as folhas individuais e/ou com o dossel vegetal. O uso de espectrômetros imageadores de alta resolução espectral é particularmente útil para medir as características de absorção e a reflectância da radiação fotossinteticamente ativa.

Visando demonstrar estes princípios, consideremos as características de reflectância espectral de quatro diferentes folhas obtidas de uma mesma árvore sadia de Liquidambar (*Liquidambar styraciflua* L.) em 11 de novembro de 1998, em Columbia, SC (Prancha Colorida 11-1). A folha verde (a), a folha amarela (b), e a folha vermelha (c) estavam ainda na árvore no momento da coleta dos dados. A folha marrom escura (d) foi coletada do chão debaixo da árvore.

Um espectrorradiômetro portátil GER 1500 (Geophysical & Environmental Research, Inc.) foi usado para fazer medições de reflectância espectral de cada uma das citadas folhas vegetais. O espectrorradiômetro obteve medidas da reflectância espectral em 512 bandas nas regiões do ultravioleta, azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, de 350 a 1050 nm. A reflectância percentual foi obtida em

condições de laboratório medindo a quantidade de energia refletida pela superfície foliar (ou seja, o alvo) dividida pela quantidade de energia refletida por uma placa de referência de Spectralon®, da seguinte forma: $\{ \text{reflectância (\%)} - [\text{alvo} / \text{referência}] \times 100 \}$. Em seguida, os valores de reflectância para cada folha, entre 400 e 1050 nm, foram plotados em um gráfico (Prancha Colorida 11-1e).

A folha verde (Prancha Colorida 11-1a) ainda estava fotossintetizando e, desta forma, produziu uma curva espectral típica de vegetação verde sadia, com fortes bandas de absorção devidas à clorofila nas regiões do azul e do vermelho (aproximadamente 6% de reflectância em 450 nm e 5% em 650 nm, respectivamente), além de um pico de reflectância no verde (11% em 550 nm). Na região do infravermelho próximo (em 900 nm), aproximadamente 76% do fluxo radiante incidente foi refletido pela folha.

A folha amarela (Prancha Colorida 11-1b) estava em processo de senescência e, desta forma, à medida que a influência da clorofila diminuiu, maiores quantidades de luz verde (24% em 550 nm) e vermelha (32% em 650 nm) foram refletidas, resultando na sua aparência amarelada. Em 750 nm a folha amarela refletiu menos fluxo radiante no infravermelho próximo do que a folha verde sadia. Entretanto, a reflectância no infravermelho próximo, em 900 nm, foi de aproximadamente 76%; portanto, muito similar à da folha verde sadia.

A folha vermelha (Prancha Colorida 11-1c) refletiu cerca de 7% no azul (em 450 nm), 6% no verde (em 550 nm) e

23% no vermelho (em 650 nm), sendo que, no infravermelho próximo, a reflectância caiu para 70%.

A folha marrom escura (Prancha Colorida 11-1d) produziu uma curva de reflectância espectral com baixo valor no azul (7% em 450 nm), no verde (9% em 550 nm) e no vermelho (10% em 650 nm) e, assim, esta combinação produziu a aparência marrom escura. A reflectância no infravermelho próximo caiu para 44% em 900 nm.

É importante entender a fisiologia das plantas em análise e especialmente as suas características de pigmentação, de tal forma que possamos ponderar como uma planta típica aparecerá quando a absorção pela clorofila começa a diminuir, seja pela senescência ou por algum tipo de estresse ambiental. Como foi mostrado anteriormente, quando uma planta está sob estresse e/ou a produção de clorofila diminui, a falta de clorofila faz com que a planta absorva menor quantidade de energia nas respectivas bandas de absorção da clorofila. Estas plantas terão uma reflectância bem maior, principalmente no verde e no vermelho do espectro, fazendo com que pareçam amareladas ou *cloróticas*. De fato, Carter (1993) sugere que o aumento da reflectância no visível é a mais consistente resposta da reflectância foliar ao estresse. A reflectância no infravermelho é um indicador consistente do estresse somente quando ocorre severa desidratação foliar (a ser demonstrado logo à frente).

Tratando-se de reflectância espectral foliar, as regiões espectrais da região visível mais sensíveis a estresse localizam-se nos intervalos de 535 a 640 nm e de 685 a 700 nm. Valores aumentados de reflectância nas proximidades de 700 nm representam o que frequentemente é chamado de "deslocamento da borda vermelha para o azul" (em inglês, "blue shift of the red edge"). Trata-se do deslocamento, em direção aos menores comprimentos de onda, da curva de transição vermelho/infravermelho próximo em vegetação estressada, quando é feita a plotagem num gráfico reflectância x comprimento de onda (Cibula e Carter, 1992). O deslocamento em direção aos menores comprimentos de onda na região entre 650 e 700 nm é particularmente evidente para as curvas de reflectância amarela e vermelha mostradas na Prancha Colorida 11-1e. O sensoriamento remoto nestes intervalos espectralmente estreitos pode fornecer um meio muito importante para detectar estresses não somente para folhas individuais como para plantas inteiras e até mesmo para dosséis vegetais densos (Carter, 1993; Carter et al., 1996).

O filme colorido normal é sensível às energias no azul, no verde e no vermelho. O filme infravermelho colorido é sensível às energias no verde, no vermelho e no infravermelho próximo, em função da presença de um filtro amarelo (ou anti-azul) (verificar no Capítulo 4). Desta forma, mesmo a mais simples câmera com um filme colorido normal ou

com um filme infravermelho colorido, além de um *filtro adequado* (um filtro chamado "*band-pass*", ou seja, que permita a passagem de determinados comprimentos de onda, impedindo outros), pode ser usada para fazer sensoriamento remoto e obter diferenças de reflectância espectral causadas por variações dos pigmentos normalmente presentes nas células do parênquima paliádico do mesófilo de folhas vegetais típicas. Entretanto, para detectar diferenças espectrais muito sutis nas bandas espectralmente estreitas sugeridas por Cibula e Carter (1992) e Carter et al. (1996), pode ser necessário o uso de um espectrorradiômetro imageador de alta resolução espectral, cujas bandas sejam muito estreitas.

Interação da Energia do Infravermelho Próximo com as Células do Mesófilo Lacunoso

Numa folha verde sadia típica, a reflectância no infravermelho próximo aumenta muito na região entre 700 e 1200 nm. Por exemplo, no caso mostrado anteriormente, a folha verde sadia refletia aproximadamente 76% da energia incidente no infravermelho próximo (em 900 nm). As folhas verdes sadias absorvem energia radiante muito eficientemente nas porções do azul e do vermelho, que são regiões espectrais necessárias para a fotossíntese. Porém, imediatamente após a banda de absorção do vermelho causada pela clorofila, por que a transmitância e a reflectância das folhas vegetais aumentam tanto, fazendo com que a absorptância caia a valores tão baixos (Figura 11-1)? É interessante enfatizar que este fenômeno acontece em todo o intervalo do infravermelho próximo onde a luz solar direta incidente sobre as plantas tem o maior volume de energia. Se as plantas absorvessem esta energia com a mesma eficiência que acontece no visível, elas poderiam esquentar muito e, desta forma, as proteínas poderiam ser irreversivelmente danificadas. Assim, as plantas desenvolveram uma adaptação, de tal forma que elas não usam esta grande quantidade de energia do infravermelho próximo, simplesmente refletindo-a ou transmitindo-a para as camadas inferiores de folhas ou para o solo.

Numa folha verde, a camada correspondente ao mesófilo esponjoso controla a quantidade de energia do infravermelho próximo que será refletida. O mesófilo esponjoso localiza-se, tipicamente, abaixo do mesófilo paliádico e é composto de muitas células e espaços de ar intercelular, como é mostrado na Figura 11-2. É aqui que as trocas de oxigênio e de dióxido de carbono ocorrem durante a fotossíntese e a respiração. Na região do infravermelho próximo, a vegetação verde sadia é geralmente caracterizada por uma alta reflectância (40 – 60%), alta transmitância (40 – 60%) e relativamente baixa absorptância (5 – 10%). Observe que os espectros de reflectância e de transmitância da folha verde sadia ao longo do visível e do infravermelho próximo são praticamente um espelho um do outro, como é mostrado na Figura 11-4 (Walter-Shea e Biehl, 1990).

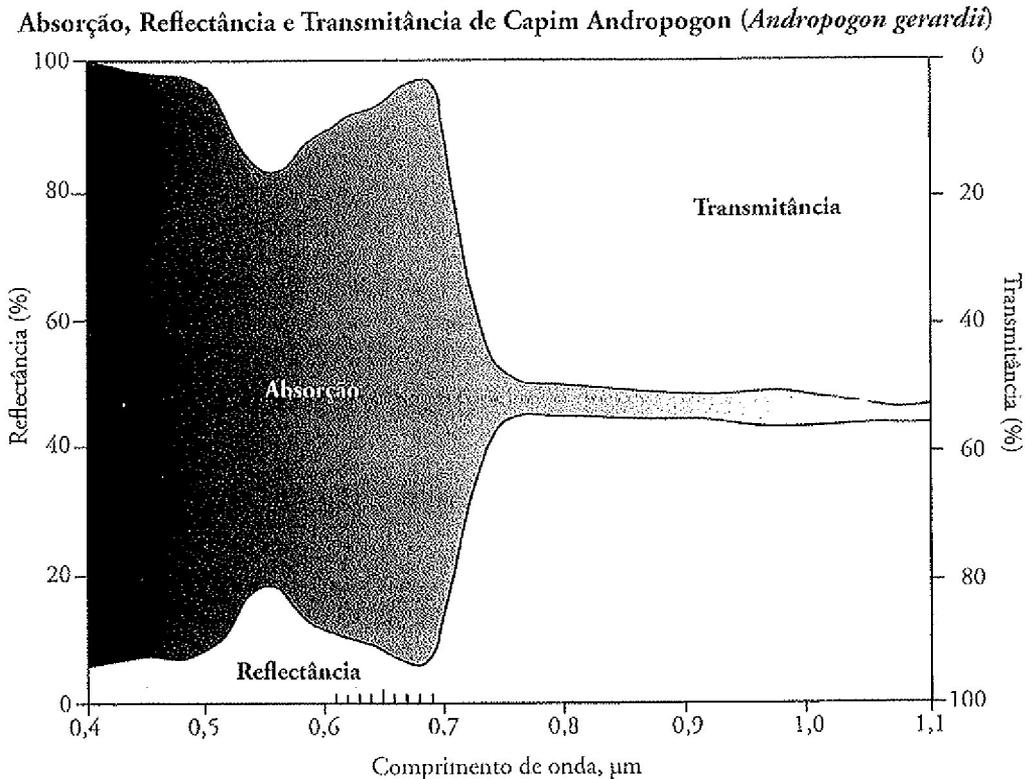


Figura 11-4 Características de reflectância, transmitância e absorção hemisféricas de superfícies foliares *adaxiais* (ou seja, as faces *superiores* ou *ventrais*) da gramínea capim andropogon obtidas com o uso de um espectrorradiômetro de laboratório. As curvas de reflectância e de transmitância são quase espelhos uma da outra, ao longo das porções do visível e do infravermelho próximo. No azul e no vermelho as clorofilas absorvem grande parte da energia incidente na porção visível do espectro (0,4 – 0,7 µm) (conforme Walter-Shea e Biehl, 1990). Espectrômetros imageadores, como o AVIRIS, são capazes de identificar pequenas mudanças nas características de absorção e de reflexão das plantas porque estes sensores podem ter canais separados por apenas 10 nm, ou seja, seriam possíveis 10 bandas na região entre 0,6 e 0,7 µm (600 a 700 nm).

A alta reflectância difusa da energia do infravermelho próximo (0,7 – 1,2 µm) é devida ao espalhamento interno causado pelas interfaces *paredes celulares* de dentro da folha (Gausmann et al., 1969; Peterson e Running, 1989). Existe uma banda de absorção causada pelo vapor d'água localizada em 0,92 – 0,98 µm; conseqüentemente, a região espectral ótima para o sensoriamento no infravermelho próximo é indicada como sendo em 0,74 – 0,90 µm (Tucker, 1978).

As principais razões pelas quais os dosséis de plantas saudáveis refletem tanto no infravermelho próximo são as seguintes:

- a folha já reflete de 40 a 60% da energia do infravermelho próximo incidente devido ao mesófilo esponjoso (Figura 11-4), e
- os restantes 45 a 50% da energia penetram (ou seja, são transmitidos) na folha e podem ser refletidos uma vez mais pelas folhas abaixo.

Este fenômeno é chamado de reflectância foliar aditiva. Considere, por exemplo, as características de reflectância e de transmitância de um hipotético dossel vegetal de duas camadas de folhas, como o mostrado na Figura 11-5. Assuma que a folha 1 reflete 50% da energia do infravermelho próximo para a atmosfera e que os restantes 50% desta energia são transmitidos através da folha 1, para a folha 2. Esta energia transmitida incide então na folha 2, onde 50% são novamente transmitidos (ou seja, 25% do fluxo original incidente) e 50% são refletidos. Esta energia refletida passa então pela folha 1, que permite que metade desta energia (ou 12,5% do fluxo original) seja transmitida e metade seja refletida. Assim, a energia total resultante deixando a folha 1, neste exemplo de um dossel hipotético de duas camadas de folhas, é 62,5% do fluxo original incidente. Portanto, quanto maior o número de camadas de folhas num dossel maduro e sadio, teoricamente maior a reflectância no infravermelho próximo. Por outro lado, se o dossel for composto por somente uma camada de folhas esparsas, então a

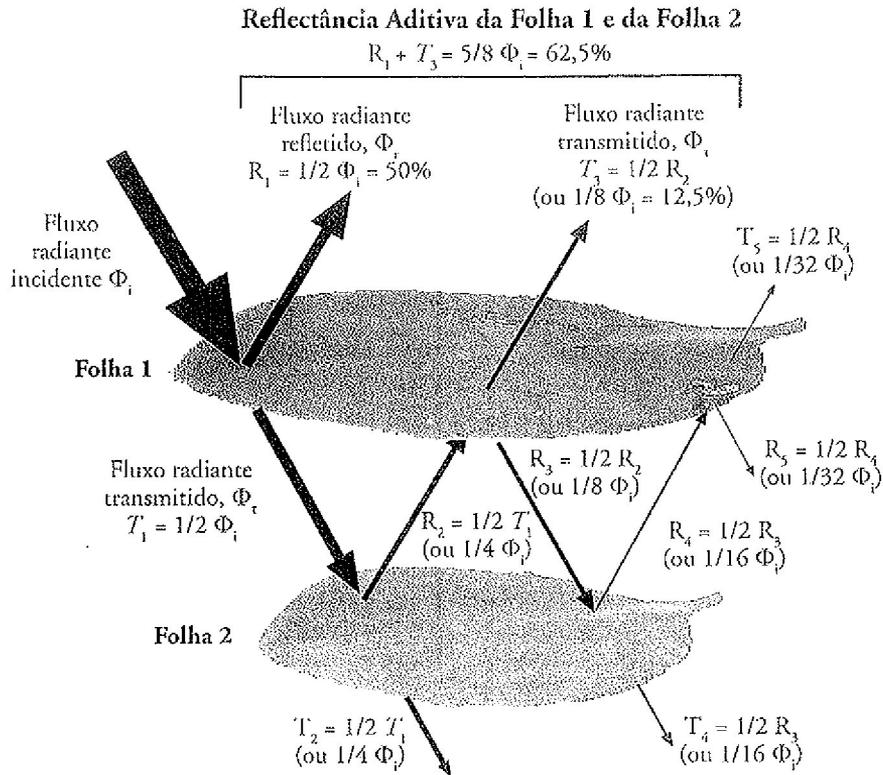


Figura 11-5 Um exemplo hipotético de *reflectância aditiva* de um dossel com duas camadas foliares. Cinquenta por cento do fluxo radiante incidente (Φ_i) na folha 1 são refletidos (R_1), e os outros 50% são transmitidos para a folha 2 (T_1). Cinquenta por cento do fluxo radiante incidente sobre a folha 2 são transmitidos através da folha 2 (T_2); os outros 50% são refletidos em direção à base da folha 1 (R_2). Cinquenta por cento da energia incidente na base da folha 1 são transmitidos através dela (T_3), enquanto que os remanescentes 50% (R_3) são refletidos em direção à folha 2 novamente. Neste ponto, uma reflectância adicional de 12,5% ($1/8$) foi acrescentada pela folha 2, elevando o fluxo radiante refletido total para 62,5%. Entretanto, para ser mais preciso, seria necessário considerar também a quantidade de energia refletida pela base da folha 1 (R_3) sobre a folha 2, a quantidade refletida pela folha 2 (R_4) e, finalmente, transmitida através da folha 1 mais uma vez (T_5), sendo que este processo poderia ser continuado mais ainda.

reflectância no infravermelho próximo não será tão grande como no dossel hipotético acima citado, porque a energia que é transmitida através da camada de folhas pode ser absorvida pela cobertura do solo abaixo dela.

Mudanças nas propriedades espectrais no infravermelho próximo da vegetação verde sadia podem fornecer informações sobre questões de senescência e/ou de estresse das plantas. Considere, por exemplo, as quatro folhas e suas características espectrais de reflectância mostradas na Prancha Colorida 11-1. A folha verde fotossintetizante (a) exibiu forte absorção clorofiliana nas regiões do azul e do vermelho, um esperado aumento de reflectância no verde e aproximadamente 76% de reflectância no infravermelho próximo. Num determinado ponto, a reflectância no infravermelho próximo diminuiu à medida que as folhas senesceram (b - d). Entretanto, se as folhas tivessem secado significativamente durante a senescência, seria de esperar

valores muito maiores de reflectância na região do infravermelho próximo (como será mostrado proximamente).

Pesquisadores têm demonstrado desde os anos 1960 que existe uma relação *direta* entre resposta no infravermelho próximo e variáveis relacionadas com biomassa. Por outro lado, também tem sido demonstrado que existe uma relação *inversa* entre a resposta no visível, particularmente no vermelho, e variáveis relacionadas com a biomassa das plantas. A melhor maneira de verificar isso é plotar num gráfico x-y todos os pixels de uma cena típica de sensoriamento remoto, considerando as reflectâncias nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo. A Figura 11-6a, por exemplo, mostra, no espaço multiespectral de atributos do vermelho e do infravermelho próximo, onde localizam-se aproximadamente 10.000 pixels de uma cena agrícola típica (ou seja, dentro da área cinza). Os campos de solos expostos secos e de solos expostos úmidos, presentes nesta mesma cena,

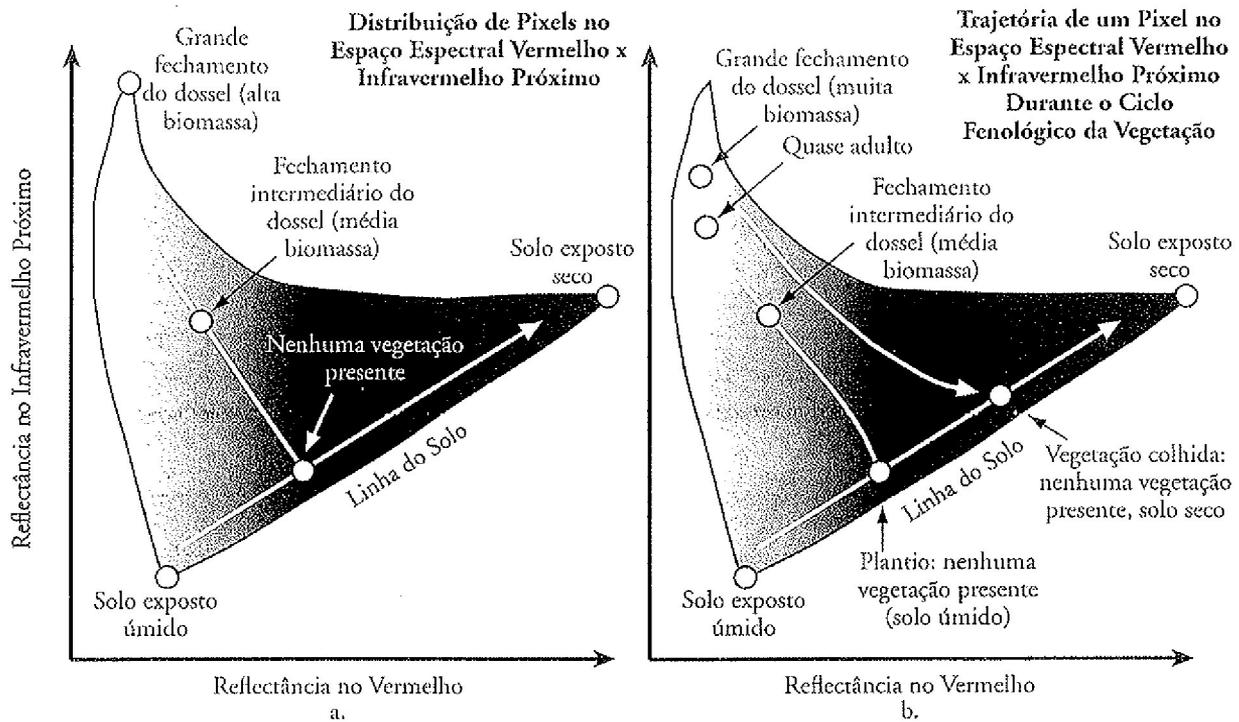


Figura 11-6 a) A distribuição de todos os pixels em uma cena, no espaço multiespectral do vermelho x infravermelho próximo, é vista na área sombreada. Campos de solos expostos úmidos ou molhados localizam-se ao longo da linha-do-solo. Quanto maior a biomassa e/ou o fechamento do dossel, maior o valor de reflectância no infravermelho próximo e menor no vermelho. Esta condição move a localização espectral do pixel na direção perpendicular que se afasta da linha-do-solo. b) A migração de um pixel de vegetação agrícola no espaço vermelho x infravermelho próximo ao longo do ciclo fenológico é mostrada. Após a emergência das plantas, há um afastamento da linha-do-solo até atingir o completo fechamento do dossel. Após a colheita, o pixel será encontrado sobre a linha-do-solo novamente, mas agora num local correspondente a condições mais secas.

localizam-se em lados opostos da *linha-do-solo*. Isto significa que um solo exposto úmido tem valores muito baixos de reflectância, tanto no vermelho quanto no infravermelho próximo. Inversamente, uma área de solo exposto seco provavelmente terá altos valores de reflectância, tanto no vermelho quanto no infravermelho próximo. À medida que um dossel vegetal se desenvolve, a sua reflectância vai aumentando no infravermelho próximo, enquanto que sua vegetação vai absorvendo cada vez mais no vermelho em função do aumento na fotossíntese. Isto faz com que a reflectância espectral do pixel mova-se numa direção perpendicular em relação à *linha-do-solo*. À medida que a biomassa aumenta e que a cobertura do dossel vegetal aumenta, a localização dos pixels correspondentes a esta parcela agrícola no espaço de atributos vermelho x infravermelho próximo move-se para regiões cada vez mais distantes da *linha-do-solo*.

A Figura 11-6b mostra o comportamento de um pixel de uma área agrícola no espaço espectral vermelho x infravermelho próximo, durante um ciclo fenológico típico. Se esta área foi preparada adequadamente, no começo do ciclo o seu correspondente pixel deveria localizar-se na região de

solos expostos úmidos da *linha-do-solo*, com baixos valores de reflectância no vermelho e no infravermelho próximo. Assim que a cultura começa a emergir, tal pixel começa a afastar-se progressivamente da *linha-do-solo*, até atingir o completo fechamento do dossel, quando o fluxo radiante no infravermelho próximo torna-se máximo e a reflectância no vermelho atinge seu ponto mínimo. Após a colheita, o pixel deverá voltar novamente para a *linha-do-solo*, porém numa posição correspondente a condições mais secas.

O tipo de comportamento acima relatado para a reflectância no vermelho e no infravermelho próximo, em relação ao desenvolvimento dos dosséis vegetais, levou ao desenvolvimento de numerosos índices de vegetação e de técnicas de estimação da biomassa que utilizam diversos tipos de parâmetros envolvendo o vermelho e o infravermelho próximo (p.ex., Richardson e Everitt, 1992; Lyon et al., 1998). O resultado é uma combinação linear que pode ser mais bem correlacionada com biomassa do que o valor do vermelho ou o do infravermelho próximo isoladamente. Diversos desses algoritmos estão sumarizados na secção sobre Índices de Vegetação deste capítulo.

Interações Entre a Energia no Infravermelho Médio e a Água do Mesófilo Esponjoso

As plantas necessitam de água para crescer. Uma folha obtém água pelo sistema radicular da planta. A água desloca-se pelas raízes, subindo pelo caule e entra na folha através do *pectolo* (ou seja, a parte que une a lâmina foliar ao caule) e, daí, pequenos vasos levam esta água até as células foliares. Se, num determinado momento, uma planta estiver bem irrigada, conterá tanta água quanto seja possível armazenar, ficando então completamente *turgida*. A maior parte desta água encontra-se no mesófilo esponjoso. Se houver falta de irrigação ou de chuva, a planta conterá uma quantidade de água menor do que é o seu máximo potencial de armazenamento de água e, neste estado, estará em *turgidez relativa*. Seria então útil a existência de um instrumento de sensoriamento remoto sensível à quantidade de água nas plantas. Até um certo ponto, o sensoriamento remoto nas regiões espectrais do infravermelho médio, do infravermelho termal (Capítulo 8) e das micro-ondas passivas (Capítulo 9) pode prover tais informações.

A água líquida na atmosfera gera cinco principais bandas de absorção nas porções entre o infravermelho próximo e o infravermelho médio do espectro eletromagnético: 0,97; 1,19; 1,45; 1,94 e 2,7 μm (Figura 11-1). A banda em 2,7 μm é devida à absorção vibracional fundamental pela água, constituindo-se na maior absorção na citada região espectral (destacando, porém, que existe também uma forte absorção em 6,27 μm , na região do infravermelho termal). Entretanto, há também uma forte relação entre a reflectância na região do infravermelho médio (1,3 – 2,5 μm) e a quantidade de água presente nas folhas de um dossel vegetal. A água nas plantas absorve a energia incidente, entre as bandas de absorção, com força crescente em comprimentos de ondas maiores. Nestes comprimentos de onda do infravermelho médio, os picos de reflectância da vegetação ocorrem aproximadamente em 1,6 μm e 2,2 μm , entre as duas principais bandas de absorção pela água atmosférica (Figura 11-1).

A água é um bom absorvedor da energia no infravermelho médio, de tal forma que quanto maior a turgidez das folhas, menores as reflectâncias no infravermelho médio. Inversamente, à medida que o conteúdo de umidade das folhas diminui, a reflectância no infravermelho médio aumenta substancialmente. À medida que a água da planta nos espaços de ar intercelular diminui, isto faz com que a energia do infravermelho médio incidente nas folhas seja mais intensamente espalhada pelas interfaces das paredes intercelulares, resultando em maiores valores de reflectância no infravermelho médio. Considere, por exemplo, as reflectâncias espectrais de amostras foliares de Magnólia em cinco diferentes condições de umidade plotadas no intervalo espectral entre 0,4 e 2,5 μm (Figura

11-7). Os intervalos de comprimentos de onda no infravermelho médio entre 1,5 – 1,8 μm e entre 2,1 – 2,3 μm são citados como mais sensíveis a mudanças no conteúdo de umidade das plantas, do que os comprimentos de onda no visível e no infravermelho próximo (isto significa que, considerando o eixo *y*, a distância entre as curvas espectrais é maior à medida que o conteúdo de umidade diminui). É interessante notar também que significativas mudanças nas curvas de reflectância no visível (0,4 – 0,7 μm) não começam a aparecer até que a umidade das folhas diminua até aproximadamente 50%. Quando o conteúdo relativo de água diminui para 50%, praticamente qualquer porção do visível, do infravermelho próximo ou do infravermelho médio pode prover alguma informação útil de reflectância espectral.

A reflectância foliar no infravermelho médio é inversamente relacionada com a absorptância de uma camada de água de aproximadamente 1 mm de espessura (Carter, 1991). A intensidade com que a energia solar incidente no infravermelho médio é absorvida pela vegetação é função da quantidade total de água presente na folha e da espessura da folha. Se a seleção de sensores e de bandas espectrais for adequada, é possível monitorar a turgidez relativa das plantas.

Os sistemas de sensoriamento remoto ópticos (exceto os radares) são geralmente limitados a funcionarem em intervalos espectrais de 0,3 – 1,3; de 1,5 – 1,8 e de 2,0 – 2,6 μm , devido a fortes bandas de absorção pela água atmosférica em 1,45; 1,94 e 2,7 μm . Felizmente, como mostrado na Figura 11-7, há uma forte sensibilidade “suplementar” ao conteúdo de água nas regiões em 1,5 – 1,8 μm e em 2,0 – 2,6 μm , que são adjacentes às principais bandas de absorção pela água. Esta é a razão pela qual os sensores Thematic Mapper (TM/Landsat-4 e TM/Landsat-5) e Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+/Landsat-7) tiveram duas bandas escolhidas nas citadas regiões espectrais: a banda 5 (1,55 – 1,75 μm) e a banda 7 (2,08 – 2,35 μm). Já foi consistentemente demonstrado que a banda no infravermelho médio (1,55 – 1,75 μm) é sensível ao conteúdo de umidade do dossel. Pierce et al. (1990), por exemplo, demonstraram que esta banda, bem como os índices de vegetação em que ela é usada, estavam correlacionados com estresses de água em dosséis de florestas coníferas.

Grande parte da água na planta é perdida via transpiração. A *transpiração* ocorre à medida que o Sol aquece a água dentro da folha, fazendo com que uma parte da água mude seu estado para vapor d'água, que escapa através dos estômatos. Algumas das funções importantes desempenhadas pela transpiração são as seguintes:

- ela refrigera o interior das folhas, uma vez que o vapor d'água que escapa contém calor;

Efeitos Espectrais do Secamento Progressivo da Folha

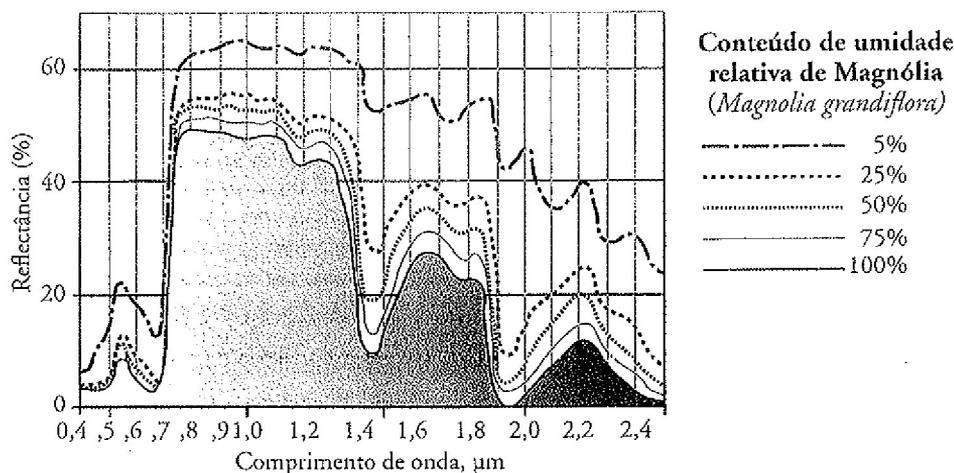


Figura 11-7 Resposta de reflectância de uma folha de Magnólia (*Magnolia grandiflora*) a diferentes conteúdos de umidade. À medida que o conteúdo de umidade diminuiu, a reflectância aumentou ao longo da região 0,4 – 2,5 μm . Entretanto, o maior aumento ocorreu na região do infravermelho médio (1,3 – 2,5 μm) (conforme Carter, 1991).

- ela mantém o fluxo ascendente de água absorvida pelas raízes, através do caule, até as folhas;
- ela assegura um suprimento constante de minerais dissolvidos provenientes do solo.

À medida que as moléculas de vapor d'água no topo da folha são perdidas por transpiração, toda a coluna d'água é puxada para cima. As plantas perdem consideráveis quantidades de água por transpiração, diariamente. Por exemplo, uma única planta de milho pode perder até cerca de 3,8 litros de água num dia muito quente. Se as raízes desta planta não puderem repor esta água, as folhas murcham, cessa a fotossíntese e a planta morre. Desta forma, monitorar o conteúdo de umidade dos dosséis vegetais, que por sua vez correlaciona-se com as taxas de transpiração, pode prover valiosas informações sobre a saúde de uma cultura agrícola ou de uma outra área de vegetação. O sensoriamento remoto no infravermelho termal e nas micro-ondas passivas também têm fornecido valiosas informações sobre evapotranspiração de dosséis vegetais.

A mais prática aplicação das informações sobre umidade das plantas é a avaliação regional das condições de umidade das culturas agrícolas com objetivos de planejamento de irrigação, de avaliação de estresses, e de modelagem de produtividade (tanto agrícola quanto de pastagens ou para manejo de florestas).

Características Avançadas de Reflectância Espectral da Vegetação: a Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB)

Seria excelente se um dossel vegetal como o de milho ou de uma plantação de pinheiros refletisse a mesma quantidade de fluxo radiante em direção a um sensor, independentemente de: 1) ângulos de incidência e azimutal solares, ou 2) geometria de visada do sensor. Isto significaria que o dossel vegetal seria uma superfície Lambertiana real, ou seja, uma superfície que reflete a energia nela incidente, em todas as direções, igualmente. Infelizmente, uma grande quantidade de investigações demonstrou que não é assim que as coisas acontecem (p.ex., Kimes, 1983). De fato, o fluxo radiante espectral que sai de um dossel vegetal é significativamente afetado por um grande número de fatores, muitos dos quais estão listados na Tabela 11-1. A seguir, discutiremos brevemente os principais parâmetros da vegetação e depois aprofundaremos mais em relação às características geométricas de iluminação solar e do sistema sensor.

A quantidade e a distribuição espectral do fluxo radiante refletido pelo dossel vegetal é influenciado pelo tipo de vegetação presente. Por exemplo, gramíneas devem refletir diferentemente em relação a um estande de árvores. Alguns dosséis vegetais possuem 100% de fechamento, recobrando completamente a superfície, o que significa que o substrato e o solo abaixo dele não são visíveis através do dossel. Inversamente, outros dosséis que apresentam menos de 100% de fechamento do dossel permitem que porções do substrato e/ou do solo reflitam energia na direção do IFOV ("instantaneous field of view" ou campo de visada instantâneo) do sensor, gerando um pixel híbrido ou misturado. É possível separar a contribuição espectral das coberturas individuais, porém isto requer considerável conhecimento em processamento de imagens.