

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

A energia registrada por um sistema de sensoriamento remoto, sofre certas interações fundamentais que precisam ser entendidas para que os dados de sensoriamento remoto possam ser interpretados apropriadamente. Por exemplo, se a energia do sensoriamento remoto vem do Sol, tal energia

- é radiada pelas partículas atômicas na fonte (o Sol),
- viaja no vácuo espacial à velocidade da luz,
- interage com a atmosfera da Terra,
- interage com a superfície da Terra,
- interage com a atmosfera da Terra novamente, e
- finalmente atinge o sensor, onde ela interage com vários componentes ópticos, filtros, emulsões de filmes, ou detectores.

É instrutivo examinar cada uma dessas interações fundamentais que a energia eletromagnética realiza à medida que progride da sua origem até o(s) detector(es) do sistema de sensoriamento remoto. O entendimento dessas interações ajuda o analista de imagens a extrair informações úteis dos dados de sensoriamento remoto (p.ex., Tuominen e Pekkarinen, 2004).



Condução, Convecção e Radiação

Energia é a capacidade de realizar trabalho. No processo de realizar trabalho, a energia frequentemente é transferida de um corpo a outro ou de um lugar a outro. Os três tipos básicos pelos quais a energia pode ser transferida incluem condução, convecção e radiação (Figura 2-1). A maioria das pessoas é familiar com a *condução*, que ocorre quando um corpo (molécula ou átomo) transfere sua energia cinética a outro pela colisão com este. É desse modo que uma panela de metal é aquecida pela chapa do fogão. Na *convecção*, a energia cinética dos corpos é transferida de um lugar a outro pela movimentação física dos corpos. Um bom exemplo é o aquecimento do ar próximo ao solo nas primeiras horas da manhã. O ar mais quente próximo à superfície sobe, formando correntes convectivas na atmosfera, as quais podem produzir nuvens do tipo cúmulos. A transferência de energia por *radiação* eletromagnética é de fundamental interesse para a ciência do sensoriamento remoto porque ela é a única forma de transferência de energia que pode ocorrer no vácuo, como é a região entre o Sol e a Terra.

Transferência de Energia

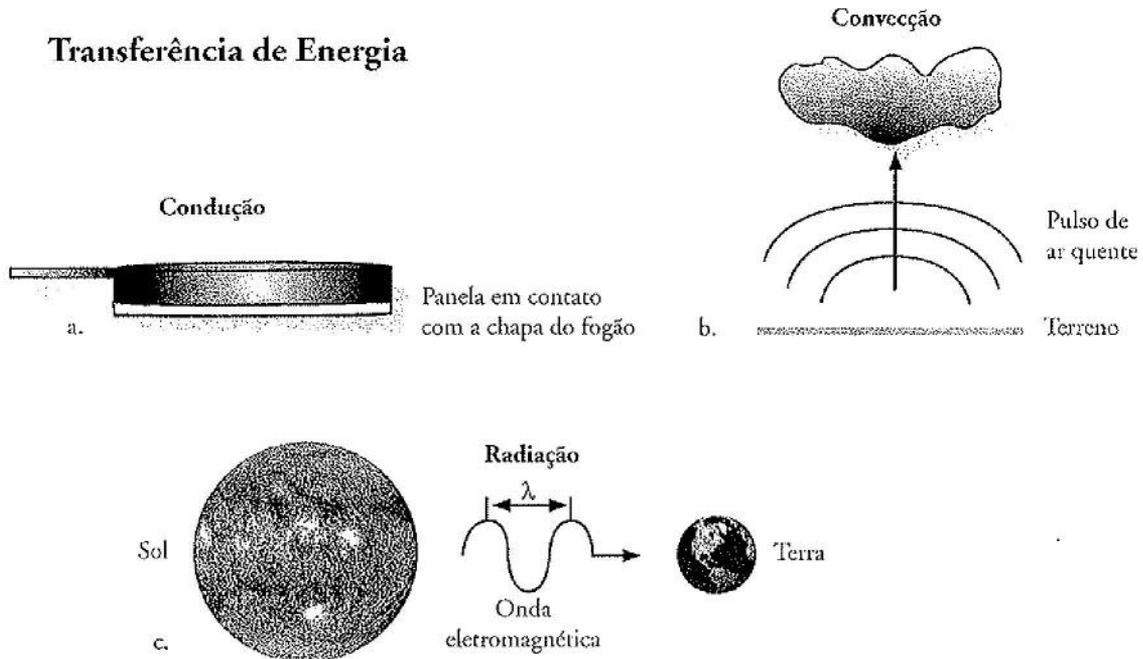


Figura 2-1 A energia pode ser transferida de três modos: condução, convecção e radiação. a) A energia pode ser conduzida diretamente de um objeto a outro como quando uma panela está em contato físico direto com a chapa de um fogão. b) O Sol banha a superfície da Terra com energia radiante fazendo com que o ar próximo ao solo aumente de temperatura. O ar menos denso sobe, criando correntes convectivas na atmosfera. c) A energia eletromagnética na forma de ondas eletromagnéticas pode ser transmitida através do vácuo espacial desde o Sol até a Terra.



Modelos de Radiação Eletromagnética

Para entender como a energia eletromagnética é criada, como ela se propaga no espaço e como ela interage com outra matéria, é útil descrever os processos usando dois diferentes modelos: o modelo *ondulatório* e o modelo de *partícula* (Englert et al., 1994).

Modelo Ondulatório da Energia Eletromagnética

Nos anos 1860s, James Clerk Maxwell (1831-1879) concebeu a radiação eletromagnética (REM) como uma onda eletromagnética que se desloca pelo espaço à velocidade da luz. Decorreram muitos anos para que os cientistas Leon Foucault e Albert A. Michelson determinassem a *velocidade da luz*, c , como 299.702.458 metros por segundo (i.e., $m s^{-1}$). Este valor é frequentemente generalizado para $3 \times 10^8 m s^{-1}$, ou $300.000 km s^{-1}$. Uma relação útil em cálculos rápidos é que a luz avança a 1 pé (0,3048 m) por nanossegundo ($10^{-9} s$) (Rinker, 1999). A *onda eletromagnética* consiste de dois campos flutuantes – um elétrico e outro magnético (Figura 2-2). Os dois vetores estão em ângulos

retos (ortogonais) entre si, e ambos são perpendiculares à direção do deslocamento da onda.

Como uma onda eletromagnética é criada? *Radiação eletromagnética* é gerada toda vez que uma carga elétrica é acelerada. O comprimento de onda (λ) da radiação eletromagnética depende da duração do tempo pelo qual a partícula carregada é acelerada. Sua frequência (ν) depende do número de acelerações por segundo. O *comprimento de onda* é formalmente definido como a distância média entre dois máximos (ou mínimos) consecutivos de um padrão grosseiramente periódico (Figuras 2-2 e 2-3) e é normalmente medido em micrômetros (μm) ou nanômetros (nm). *Frequência* é o número de comprimentos de onda que passam por um ponto por unidade de tempo. Uma onda que envia uma crista a cada segundo (completando um ciclo) é dita como tendo uma frequência de um ciclo por segundo. Ou um *hertz*, abreviado como 1 Hz. As unidades de medida frequentes para comprimento de onda e frequência são apresentadas na Tabela 2-1.

A relação entre o comprimento de onda (λ) e a frequência (ν) da radiação eletromagnética baseia-se na seguinte fórmula, onde c é a velocidade da luz (Rott, 2000):

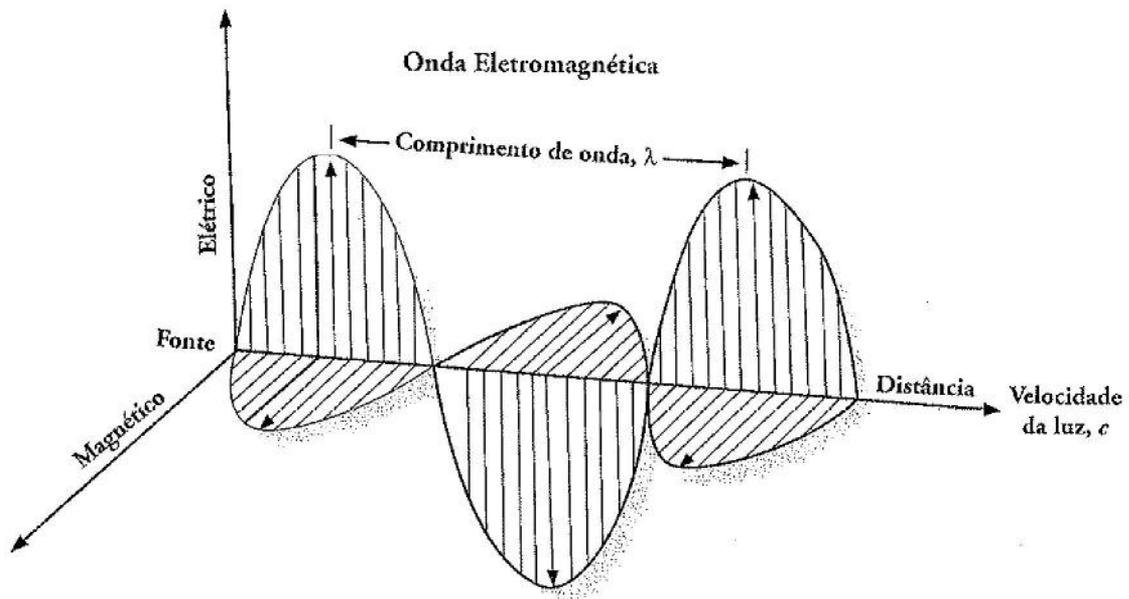


Figura 2-2 Uma onda eletromagnética é composta pelos vetores elétrico e magnético, que são ortogonais (em ângulos de 90°) entre si. As ondas deslocam-se da fonte à velocidade da luz (3×10^8 m s⁻¹).

$$c = \lambda \nu, \tag{2-1}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \tag{2-2}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \tag{2-3}$$

Observe que a frequência é *inversamente* proporcional ao comprimento de onda. Essa relação é mostrada diagramaticamente na Figura 2-3, onde quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência; menor o comprimento de onda, maior a frequência. Quando a radiação eletromagnética passa de uma substância para outra, a velocidade da luz e o comprimento de onda mudam, enquanto que a frequência permanece constante.

Todos os objetos acima do zero absoluto (-273 °C ou 0 K) emitem energia eletromagnética, incluindo a água, solo, rocha, vegetação e a superfície do Sol. O Sol representa a fonte inicial da maioria da energia eletromagnética registrada pelos sistemas de sensoriamento remoto (exceto o RADAR, LIDAR e SONAR) (Figura 2-4; Prancha Colorida 2-1). Podemos ver o Sol como um *corpo negro* a 5.770 – 6.000 K (um ente teórico que absorve e radia energia à maior taxa unitária possível por unidade de área em cada comprimento de onda (λ) e para uma dada temperatura). O total de radiação emitida por um corpo negro (M_λ) medida em watts por m² é proporcional à quarta potência da

sua temperatura absoluta (T) medida em kelvin (K). Esta é conhecida como a *lei de Stefan-Boltzmann* e é expressa como (Rott, 2000):

$$M_\lambda = \sigma T^4 \tag{2-4}$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, $5,6697 \times 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴. É importante lembrar que a quantidade de energia emitida por um objeto tal como o Sol ou a Terra é uma função de sua temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a quantidade de energia que emana do objeto. A quantidade de energia emitida por um objeto é computada pela soma (integração) da área sob sua curva (Figura 2-5). É claro a partir dessa ilustração que o total de radiação emitida pelo Sol a 6.000 K é muito maior que a emitida pela Terra a 300 K.

Além do cálculo do total de energia que emana de um corpo negro teórico como o Sol, podemos determinar seu comprimento de onda dominante (λ_{max}) com base na *lei do deslocamento de Wien*:

$$\lambda_{max} = \frac{k}{T} \tag{2-5}$$

Onde k é uma constante equivalente a 2.898 $\mu\text{m K}$, e T é a temperatura absoluta em kelvin. Assim, como o Sol se aproxima de um corpo negro a 6.000 K, o comprimento de onda dominante (λ_{max}) é 0,483 μm :

$$0,483 \mu\text{m} = \frac{2.898 \mu\text{m K}}{6.000 \text{ K}}$$

Relação Inversa Entre Comprimento de Onda e Frequência

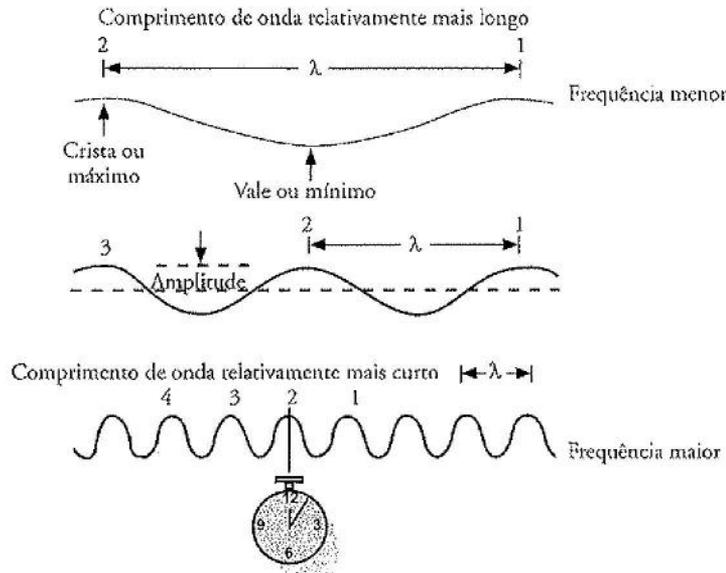


Figura 2-3 Este corte transversal de várias ondas eletromagnéticas ilustra a relação inversa entre comprimento de onda (λ) e frequência (ν). Quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência; quanto menor o comprimento de onda, maior a frequência. A amplitude de uma onda eletromagnética é a altura da crista da onda em relação à posição fixa. Cristas de onda sucessivas são numeradas como 1, 2, 3 e 4. Um observador na posição do relógio registra o número de cristas que passam a cada segundo. Esta frequência é medida em ciclos por segundo, ou *hertz*.

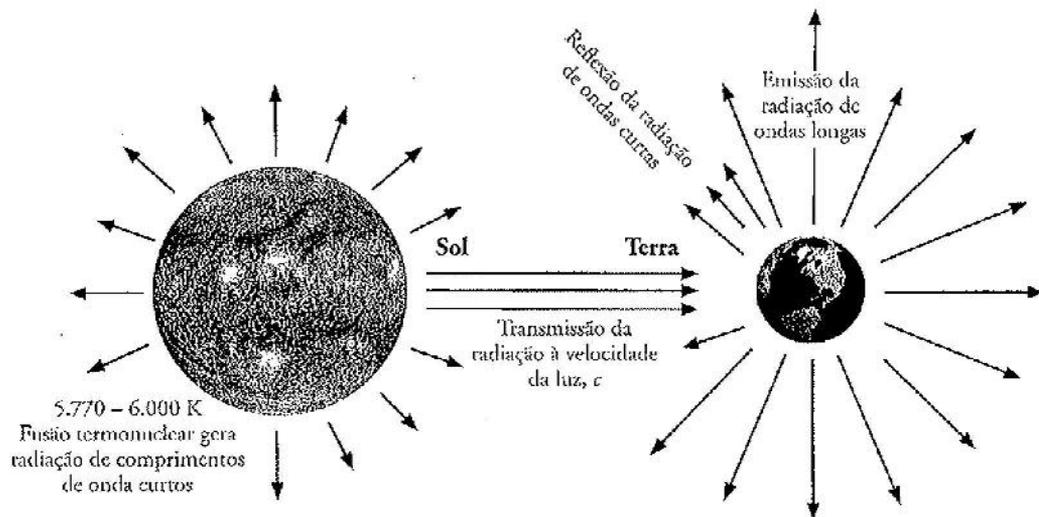


Figura 2-4 A fusão termonuclear ocorrendo na superfície do Sol gera um espectro contínuo de energia eletromagnética. A temperatura de 5.770 - 6.000 K desse processo produz uma grande quantidade de energia de comprimentos de onda relativamente curtos que se desloca através do vácuo do espaço à velocidade da luz. Parte dessa energia é interceptada pela Terra, onde ela interage com a atmosfera e com os materiais da superfície. A Terra reflete parte dessa energia diretamente de volta para o espaço exterior ou pode absorver a energia de comprimentos de onda menores e então reemitir-la em comprimentos de onda maiores (após Strahler e Strahler, 1989).

Tabela 2-1. Unidades de medida padrões para comprimento de onda e frequência.

Comprimento de onda (λ)	
Quilômetro (km)	1.000 m
Metro (m)	1,0 m
Centímetro (cm)	0,01 m = 10^{-2} m
Milímetro (mm)	0,1 m = 10^{-3} m
Micrômetro (μ m)	0,000001 m = 10^{-6} m
Nanômetro (nm)	0,000000001 m = 10^{-9} m
Angström (Å)	0,0000000001 m = 10^{-10} m
Frequência (ciclos por segundo)	
Hertz (Hz)	1
Quilohertz (kHz)	1.000 = 10^3
Megahertz (MHz)	1.000.000 = 10^6
Gigahertz (GHz)	1.000.000.000 = 10^9

A energia eletromagnética proveniente do Sol leva oito minutos para se deslocar pelos 150 milhões de quilômetros de espaço até a Terra. Como mostrado na Figura 2-5, a Terra aproxima-se de um corpo negro a 300 K (27 °C) com um comprimento de onda dominante em aproximadamente 9,66 μ m:

$$9,66 \mu\text{m} = \frac{2.898 \mu\text{m K}}{300 \text{ K}}$$

Embora o Sol tenha um comprimento de onda dominante em 0,48 μ m, ele produz um espectro contínuo de radiação eletromagnética variando desde ondas muito curtas, de extrema alta frequência como os raios gama e cósmicos, até ondas de rádio de muito baixa frequência (Figuras 2-6 e 2-7). A Terra intercepta uma porção muito pequena da energia eletromagnética produzida pelo Sol.

Como mencionado no Capítulo 1, na pesquisa em sensoriamento remoto frequentemente especificamos uma região particular do espectro eletromagnético (p.ex., luz vermelha) identificando um comprimento de onda (ou frequência) inicial e final e depois colocando uma descrição. Este intervalo de comprimento de onda (ou frequência) no espectro eletromagnético é comumente chamado de *banda*, *canal*, ou *região*. As principais subdivisões da luz visível estão resumidas na Tabela 2-2 e apresentadas diagramaticamente na Figura 2-7 e na Prancha Colorida 2-2. Geralmente pensamos na luz visível como sendo composta de energia nas bandas do azul (0,4 – 0,5 μ m), verde (0,5 – 0,6 μ m) e vermelho (0,6 – 0,7 μ m) do espectro eletro-

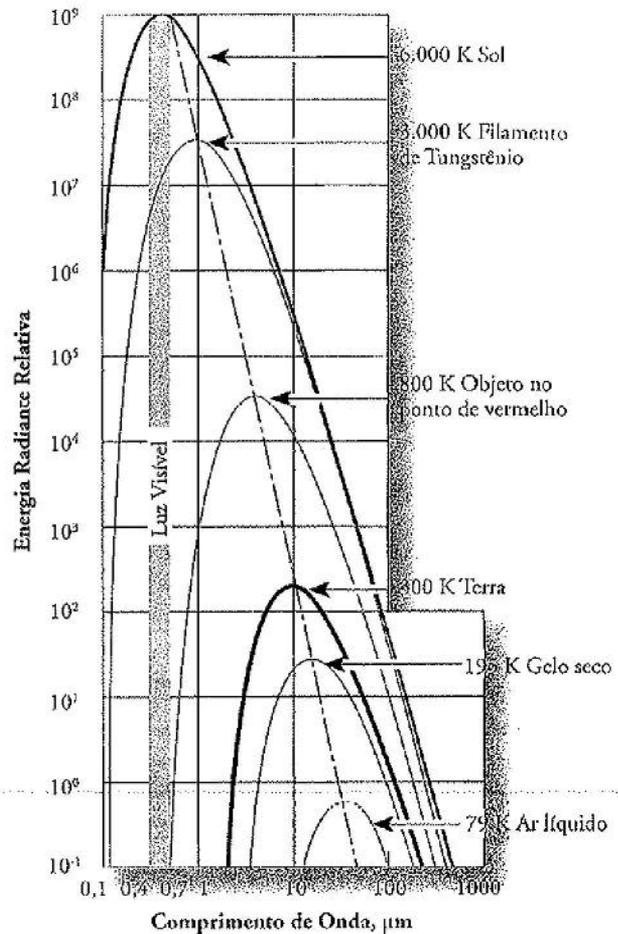


Figura 2-5 Curvas de radiação de corpo negro para diversos objetos, incluindo o Sol e a Terra, que se aproximam de corpos negros às temperaturas de 6.000 K e 300 K, respectivamente. A área sob cada curva pode ser integrada para computar a energia radiante total (M_e) emanando de cada objeto (Equação 2-4). Assim, o Sol produz mais existência radiante do que a Terra porque sua temperatura é maior. À medida que a temperatura do corpo aumenta, seu comprimento de onda dominante (λ_{max}) desloca-se em direção aos menores comprimentos de onda do espectro.

magnético. A energia eletromagnética no infravermelho próximo refletida na região de 0,7 a 1,3 μ m é comumente usada para expor filmes preto e branco e filmes coloridos sensíveis ao infravermelho.

A região do infravermelho médio (frequentemente chamada de infravermelho de ondas curtas, SWIR – short wavelength infrared) inclui energia com comprimentos de onda de 1,3 a 3,0 μ m. A região do infravermelho termal tem duas bandas muito úteis em 3 a 5 μ m e 8 a

Tabela 2-2. Métodos de descrição da cor espectral (após Nassau, 1983).

Cor ^a	Descrição em Comprimento de Onda				Descrição em Energia	
	Angstrom (Å)	Nanômetro (nm)	Micrômetro (µm)	Frequência (Hz x 10 ¹⁴)	Número de Onda ^c (ψ cm ⁻¹)	Elétron-volt (eV) = 1240/λ
Ultravioleta, sw	2.537	254	0,254	11,82	39.400	4,89
Ultravioleta, lw	3.660	366	0,366	8,19	27.300	3,39
Violeta (limite) ^b	4.000	400	0,40	7,50	25.000	3,10
Azul	4.500	450	0,45	6,66	22.200	2,75
Verde	5.000	500	0,50	6,00	20.000	2,48
Verde	5.500	550	0,55	5,45	18.200	2,25
Amarelo	5.800	580	0,58	5,17	17.240	2,14
Laranja	6.000	600	0,60	5,00	16.700	2,06
Vermelho	6.500	650	0,65	4,62	15.400	1,91
Vermelho (limite) ^b	7.000	700	0,70	4,29	14.300	1,77
Infravermelho, próximo	10.000	1.000	1,0	3,00	10.000	1,24
Infravermelho, distante	300.000	30.000	30,00	0,10	333	0,041

^aApenas valores típicos; lw = comprimentos de onda longos; sw = comprimentos de onda curtos. ^bO limite exato depende do observador, intensidade da luz, adaptação da vista, e outros fatores. ^cO número de onda (ψ) é o número de ondas numa unidade de comprimento (usualmente por cm). Assim, $\psi = 1/\lambda$ (cm) = $10.000/\lambda$ (µm) = $100.000.000/\lambda$ (Å) em cm⁻¹.

14 µm. A porção das micro-ondas do espectro eletromagnético consiste de comprimentos de onda muito maiores (1 mm – 1 m). A porção das ondas de rádio do espectro pode ser subdividida em UHF, VHF, e frequências de rádio HF, LF e ULF.

A resolução espectral da maioria dos sistemas de sensoramento remoto é descrita em termos de bandas do espectro eletromagnético. Por exemplo, as dimensões espectrais das quatro bandas dos sensores Multispectral Scanner (MSS) do Landsat e do High Resolution Visible (HRV) do SPOT são mostradas na Figura 2-8, junto com a resolução espacial de cada banda para fins de comparação. As especificações exatas das bandas MSS/Landsat e do SPOT são fornecidas no Capítulo 7.

A energia eletromagnética pode ser descrita não apenas em termos de comprimento de onda e frequência, mas também em unidades de energia do fóton tais como joules (J) e elétronvolts (eV), como mostrado na Figura 2-7. Diversas das mais importantes conversões de massa, energia e potência são mostradas na Tabela 2-3.

O Modelo de Partícula: Radiação das Estruturas Atômicas

Na *Opticks*¹ (1704), Sir Isaac Newton afirmou que a luz era um feixe de partículas, ou corpúsculos, deslocando-se em linhas retas. Ele também sabia que a luz tinha características ondulatórias com base em seus trabalhos com placas de vidro. Não obstante, durante os duzentos anos antes de 1905, a luz foi encarada primariamente como uma onda plana e contínua. Depois, Albert Einstein (1879 – 1955) descobriu que quando a luz interage com elétrons, tem um caráter diferente (Figura 2-9). Concluiu que quando a luz interage com a matéria, ela comporta-se como se fosse composta de muitos corpos individuais chamados *fótons*, os quais portam propriedades parecidas com as de partículas, como energia e momento (Meadows, 1992). Como resultado, hoje a maioria dos físicos responderiam à pergunta, “O que é a luz?” dizendo que a luz é um tipo *particular* de matéria (Feinberg, 1985). Assim, às vezes descrevemos

¹ N.T.: há tradução em português, feita por André Koch Torres Assis, pela editora EDUEB, com o título *Óptica*.

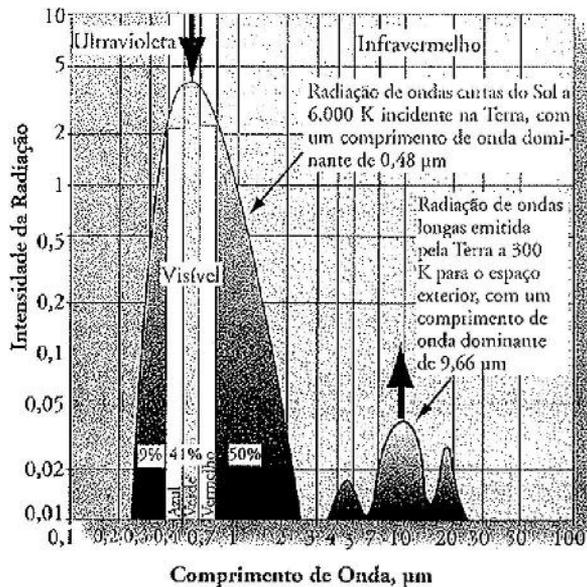


Figura 2-6 O Sol aproxima-se de um corpo negro a 6.000 K com um comprimento de onda dominante de aproximadamente 0,48 μm. A Terra aproxima-se de um corpo negro a 300 K com um comprimento de onda dominante de aproximadamente 9,66 μm. O Sol a 6.000 K produz aproximadamente 41% da sua energia na região do visível, de 0,4 a 0,7 μm (luz azul, verde e vermelha). Os outros 59% da energia estão em comprimentos de onda menores que os da luz azul (<0,4 μm) e maiores do que os da luz vermelha (>0,7 μm). Nossos olhos são sensíveis apenas à luz de 0,4 a 0,7 μm (após Strahler, 1989). Felizmente, é possível fazer detectores para sensores remotos sensíveis à energia dessas regiões não-visíveis do espectro.

a energia eletromagnética em termos de suas propriedades de onda. Mas quando a energia interage com a matéria, é útil descrevê-la como pacotes discretos de energia, ou *quanta*. É prático revisar como a energia eletromagnética é gerada no nível atômico; isso fornece uma compreensão de como a luz interage com a matéria.

Elétrons são as pequenas partículas carregadas negativamente que se movem ao redor do núcleo carregado positivamente de um átomo (Figura 2-10). Os átomos de diferentes substâncias são constituídos de um número variável de elétrons arranjados de diferentes modos. A interação entre o núcleo carregado positivamente e o elétron carregado negativamente mantém o elétron em órbita. Embora sua órbita não seja explicitamente fixa, cada movimento do elétron é restrito a certas distâncias definidas do núcleo. Os percursos orbitais permitidos dos elétrons que se movem ao redor de um átomo podem ser vistos como clas-

Tabela 2-3. Conversões de massa, energia e potência.

Conversão do Sistema Inglês para o SI (Sistema Internacional)		
Para obter:	Multiplique:	Por:
newtons ^a	libras	4,448
joules ^b	BTUs ^c	1055
joules	calorias ^d	4,184
joules	kilowatt-horas ^e	3,6 x 10 ⁶
joules	pés-libras ^f	1,356
joules	cavalos ^g	745,7

Conversão do SI (Sistema Internacional) para o Sistema Inglês		
Para obter:	Multiplique:	Por:
BTUs	joules	0,00095
calorias	joules	0,2390
kilowatt-horas	joules	2,78 x 10 ⁷
pés-libras	joules	0,7375
cavalos	watts	0,00134

^anewton; força necessária para acelerar uma massa de 1 kg a 1 m s⁻².

^bjoule: uma força de 1 newton atuando por 1 metro.

^cUnidade térmica britânica, ou BTU: energia necessária para elevar a temperatura de 1 libra de água de 1 grau Fahrenheit.

^dcaloria: energia necessária para elevar a temperatura de 1 quilograma de água de 1 grau Celsius.

^equilowatt-hora: 1.000 joules por segundo por 1 hora.

^fpé-libra: uma força de 1 libra atuando por 1 pé.

^gcavalo: 550 pés-libras por segundo.

ses ou níveis de energia (Figura 2-10a). A fim de que um elétron possa saltar para uma classe maior, é preciso que um trabalho seja realizado. Entretanto, a menos que uma quantidade de energia seja disponível para mover o elétron de pelo menos um nível energético acima, ele não aceitará o trabalho. Se uma quantidade suficiente de energia é recebida, o elétron irá saltar para um novo nível e diz-se que o átomo está *excitado* (Figura 2-10b). Uma vez que o elétron esteja numa órbita mais alta, ele possui energia potencial. Após cerca de 10⁻⁸ segundos, o elétron retorna ao nível de energia ou órbita de mais baixa energia livre do átomo e libera radiação (Figura 2-10c). O comprimento de onda da radiação liberada é uma função da quantidade de trabalho realizado no átomo, i.e., o quantum de energia que ele absorveu para fazer com que o elétron fosse excitado e se movesse para uma órbita mais alta.

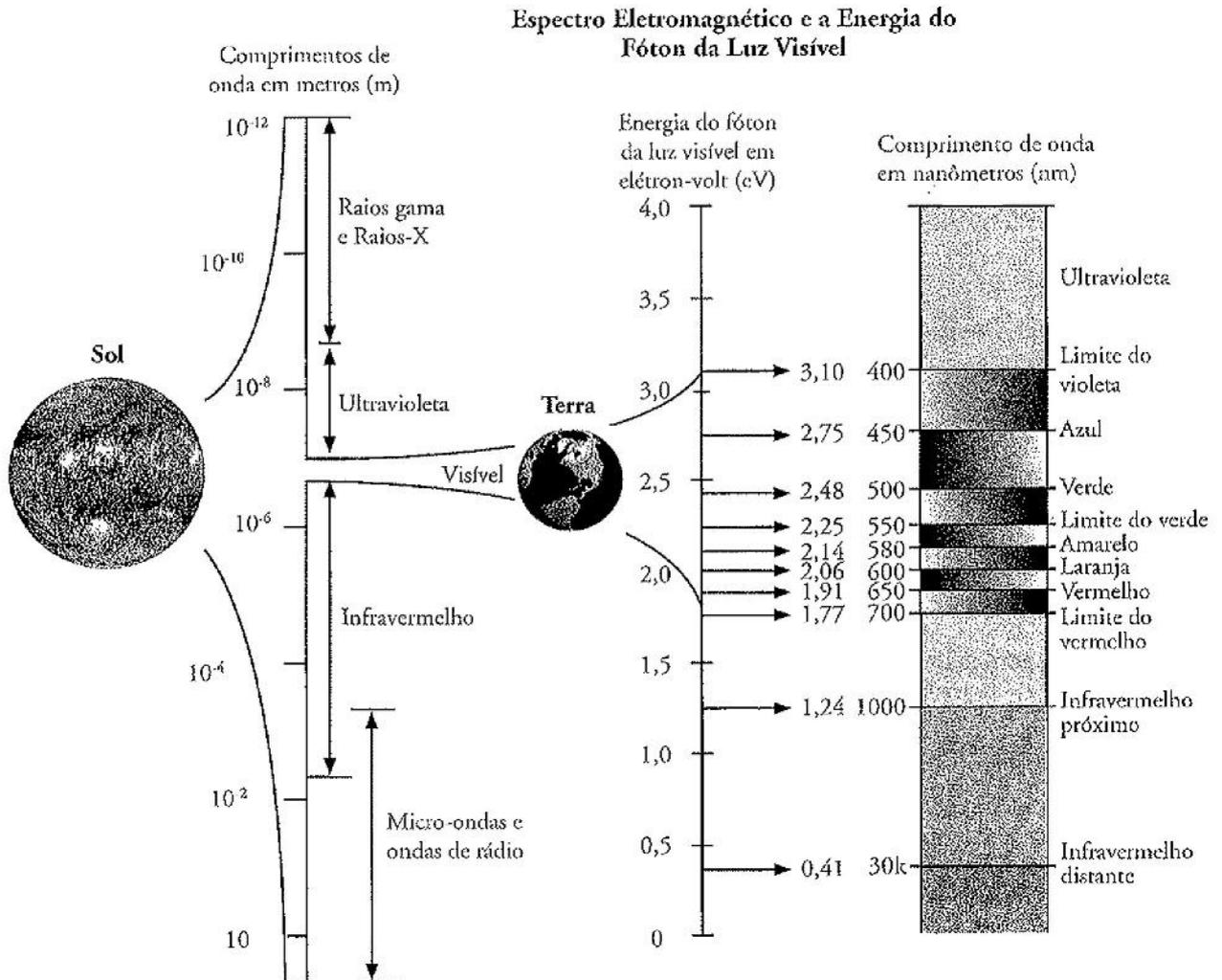


Figura 2-7 O espectro eletromagnético e a energia do fóton da luz visível. O Sol produz um espectro contínuo de energia desde os raios gama até as ondas de rádio, que banha continuamente a Terra com energia. A porção visível do espectro pode ser medida usando comprimentos de onda (medidos em micrômetros ou nanômetros, i.e., μm ou nm) ou elétron-volt (eV).

As órbitas eletrônicas são como degraus de uma escada. Ganhos de energia movem o elétron para cima na escada de energia; emissão de energia move-o para baixo. Porém, a escada de energia difere de uma escada comum, pois seus degraus não são igualmente espaçados. Isso significa que a energia que um elétron necessita absorver, ou ceder, a fim de saltar de uma órbita para a próxima pode não ser a mesma que a troca energética necessária para alguns dos outros degraus. Além disso, um elétron não usa necessariamente degraus consecutivos. Ao invés disso, ele usa o que os físicos denominam *regras de seleção*. Em muitos casos, um elétron usa uma sequência de degraus à medida que sobe a escada e outra sequência à medida que desce (Nassau, 1983; 1984). A energia que fica disponível quando o elétron eletricamente carregado se move de um estado ex-

citado (Figura 2-10b) para um estado não-excitado (Figura 2-10c) é emitida pelo átomo como um pacote único de radiação eletromagnética, uma unidade de luz com comportamento de partícula, chamado *fóton*. Toda vez que um elétron salta de um nível energético maior para um menor, um fóton move-se para fora à velocidade da luz.

De alguma forma um elétron deve desaparecer de sua órbita original e reaparecer na sua órbita de destino sem nunca ter que atravessar quaisquer das posições intermediárias. Este processo é chamado de *passo quântico* ou *salto quântico*. Se o elétron salta do seu estado de excitação mais alto para o estado basal num único salto, ele emitirá um único fóton de energia. Também é possível ao elétron saltar de uma órbita excitada até o nível de base numa série de saltos

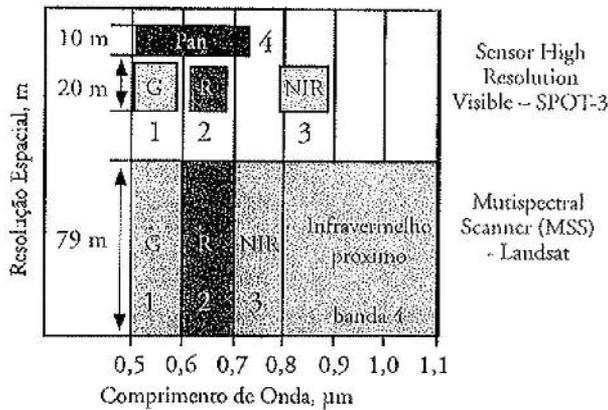


Figura 2-8 As larguras nominais das bandas espectrais individuais dos sistemas sensores MSS/Landsat e do HRV/SPOT são resumidas ao longo das abscissas. A resolução espacial de cada banda individual é mostrada no eixo das ordenadas.

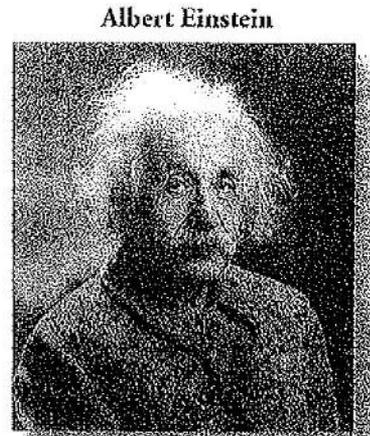


Figura 2-9 Albert Einstein (1879-1955) (cortesia da Library of Congress).

(p.ex., do 4 para o 2 para o 1). Se ele dá dois passos para atingir o nível de base, então cada um desses saltos emitirá fótons de um pouco menos de energia. As energias nesses dois saltos devem produzir uma soma total igual a um único salto maior (Trefil e Hazen, 1995).

Niels Bohr (1885-1962) e Max Planck (1858-1947) reconheceram a natureza discreta das trocas de energia radiante e propuseram a *teoria quântica* da radiação eletromagnética. Esta teoria postula que a energia é transferida em pacotes discretos chamados quanta ou fótons, como discutido. A relação entre a frequência da radiação expressa pela teoria ondulatória e o quantum é:

$$Q = h\nu \tag{2-6}$$

Onde Q é a energia de um quantum medida em joules, h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s), e ν é a frequência da radiação (Figura 2-11). Tomando a Equação 2-6, podemos multiplicar a equação por h/b , ou 1, sem alterar seu valor:

$$\lambda = \frac{hc}{h\nu} \tag{2-7}$$

Substituindo Q por $h\nu$ (da Equação 2-6), podemos expressar o comprimento de onda associado com o quantum de energia como:

$$\lambda = \frac{hc}{Q} \tag{2-8}$$

ou

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \tag{2-9}$$

Assim, vemos que a energia de um quantum é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, i.e., quanto maior o comprimento de onda envolvido, menor seu conteúdo energético. Esta relação inversa é importante para o sensoriamento remoto porque ela sugere que é mais difícil detectar a energia de comprimentos de onda maiores sendo emitida em comprimentos de onda do infravermelho termal do que aquecida nos menores comprimentos de onda do visível. De fato, é necessário fazer o sensor olhar ou permanecer visando por mais tempo uma parcela do terreno se estivermos tentando medir a energia em comprimentos de onda maiores.

As substâncias têm cores por causa das diferenças nos seus níveis de energia e nas regras de seleção. Por exemplo, considere o vapor de sódio energizado que produz uma luz amarela brilhante que é usada em algumas lâmpadas de ruas. Quando a lâmpada de vapor de sódio é ligada, vários milhares de volts de eletricidade energizam o vapor. O elétron mais externo em cada átomo energizado do vapor de sódio sobe para um degrau mais alto na escada de energia e depois retorna a descida da escada numa certa sequência de degraus, dos quais os dois últimos são separados por 2,1 eV (Figura 2-12). A energia liberada neste último salto parece com um fóton de luz amarela com um comprimento de onda de 0,58 μm com 2,1 eV de energia (Nassau, 1983).

A matéria pode ser aquecida a temperaturas tão altas que os elétrons, que normalmente se movem em órbitas fixas e não-radiantes, tornam-se livres. Este é o chamado *efeito fotoelétrico* (Figura 2-10d). Quando isso acontece, o átomo permanece com uma carga positiva igual à do elétron negativamente carregado que escapou. O elétron torna-se um elétron livre e o átomo é chamado de *ion*. Nas partes do ultravioleta e visível (azul, verde e vermelho) do espectro

Criação de Luz a Partir de uma Partícula Atômica e o Efeito Fotoelétrico

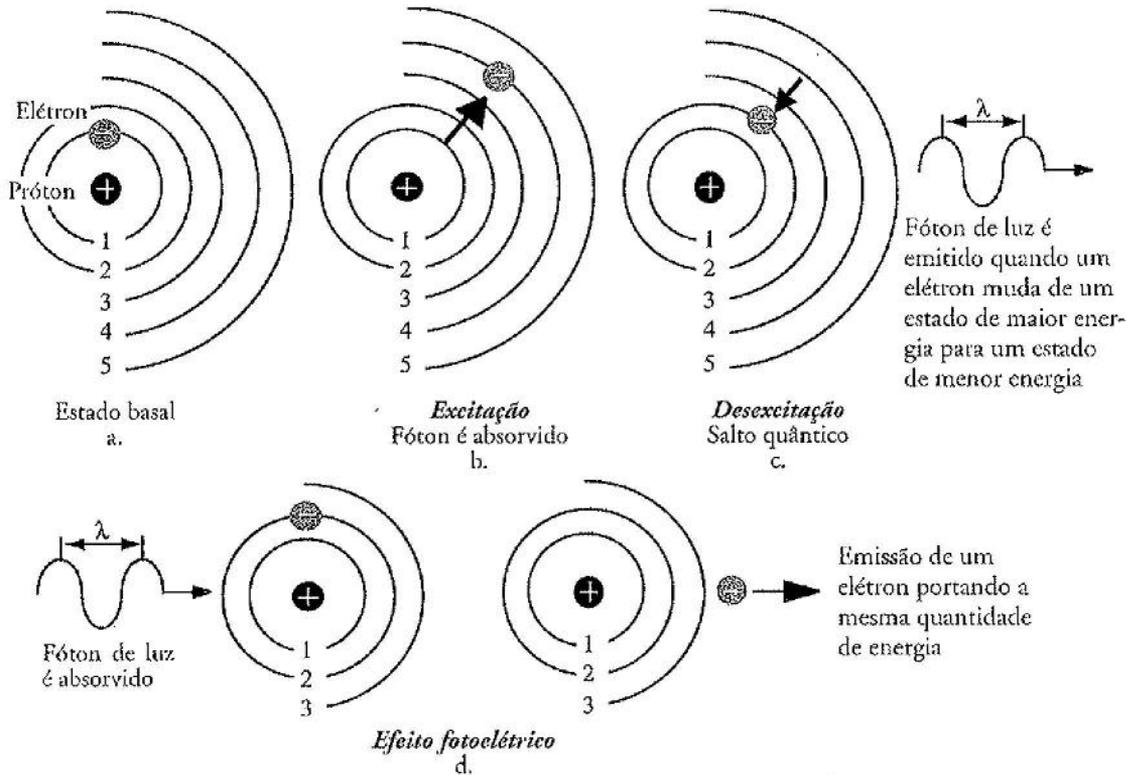


Figura 2-10 a-c) Um fóton de energia eletromagnética é emitido quando um elétron num átomo ou molécula salta de um estado de maior energia para um estado de menor energia. A luz emitida (i.e., seus comprimentos de onda) é uma função das mudanças nos níveis de energia do elétron de valência mais externa. Por exemplo, luz amarela é produzida por uma lâmpada de vapor de sódio na Figura 2-12. d) A matéria também pode ser submetida a temperaturas tão altas que os elétrons, que normalmente se movem em órbitas fixas e não-radiaantes, tornam-se livres. Quando isso acontece, o átomo permanece com uma carga positiva igual à do elétron negativamente carregado que escapou. O elétron torna-se um elétron livre e o átomo é chamado de íon. Se um outro elétron livre completa o nível de energia vazio criado pelo elétron liberado, então é produzida radiação de todos os comprimentos de onda, i.e., um espectro de energia contínuo. O intenso calor na superfície do Sol produz um espectro contínuo desta maneira.

eletromagnético, a radiação é produzida por mudanças nos níveis de energia dos elétrons de valências mais externas. Os comprimentos de onda da energia produzida são uma função dos níveis orbitais particulares dos elétrons envolvidos no processo de excitação. Se os átomos absorvem suficiente energia para serem ionizados e se um elétron livre cai para preencher o nível de energia disponível, então a radiação liberada não é quantizada e um *espectro contínuo* é produzido ao invés de uma banda ou uma série de bandas. Cada encontro de um desses elétrons livres com um núcleo carregado positivamente causa mudanças rápidas nos campos elétrico e magnético, de tal forma que é produzida radiação em todos os comprimentos de onda. A superfície quente do Sol em sua grande parte é um *plasma* no qual é produzida radiação de todos os comprimentos de onda. Como mostrado anteriormente na Figura 2-7, o espectro de um plasma como o do Sol é contínuo.

Em átomos e moléculas, mudanças nas órbitas dos elétrons produzem as radiações de menores comprimentos de onda, mudanças nos movimentos vibracionais das moléculas produzem energia no infravermelho e/ou no infravermelho médio, e mudanças nos movimentos rotacionais produzem radiação no infravermelho distante ou nas micro-ondas. No Capítulo 8 (Sensoriamento Remoto no Infravermelho Térmal) será dito mais sobre como a radiação no infravermelho térmal é produzida e registrada pelos sistemas de sensoriamento remoto.



Interações Energia-Matéria na Atmosfera

Energia radiante é a capacidade de a radiação numa banda espectral realizar trabalho. Uma vez que a radiação eletromagnética é gerada, ela é propagada através da atmosfera da

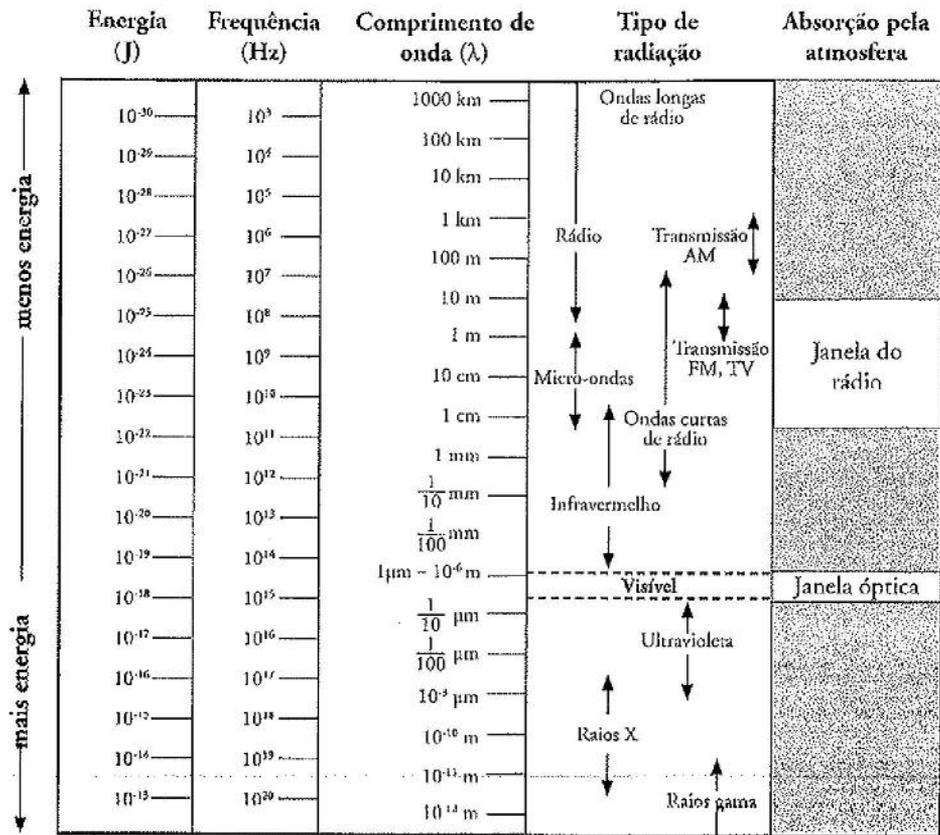


Figura 2-11 A energia dos quanta (fótons) variando dos raios gama às ondas de rádio no espectro eletromagnético.

Terra quase à velocidade da luz num vácuo. Ao contrário de um vácuo no qual nada acontece, porém, a atmosfera pode afetar não apenas a velocidade da radiação como também seu comprimento de onda, sua intensidade e sua distribuição espectral. A radiação eletromagnética pode também ser desviada da sua direção original devido à refração.

Refração

A velocidade da luz no vácuo é de 3×10^8 m s⁻¹. Quando a radiação eletromagnética encontra substâncias de diferentes densidades, como ar e água, pode ocorrer a refração. A *refração* refere-se ao desvio da luz quando ela passa de um meio a um outro de densidade diferente. A refração ocorre porque os meios são diferentes em densidade e a velocidade da REM (radiação eletromagnética) é diferente em cada um deles. O *índice de refração (n)* é uma razão entre a velocidade da luz no vácuo, *c*, e a velocidade da luz numa substância como a atmosfera ou água, *c_n*:

$$n = \frac{c}{c_n} \tag{2-10}$$

A velocidade da luz numa substância nunca pode atingir a velocidade da luz no vácuo. Portanto, o índice de refração sempre deve ser maior do que 1. Por exemplo, o índice de refração para a atmosfera é 1,0002926 e é 1,33 para a água. A luz desloca-se mais lentamente através da água por causa da maior densidade desta.

A refração pode ser descrita pela lei de Snell, que postula que para uma dada frequência da luz (devemos usar frequência uma vez que, ao contrário do comprimento de onda, ela não muda quando a velocidade da luz muda), o produto do índice de refração pelo seno do ângulo entre o raio e a linha normal à interface é constante:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \tag{2-11}$$

Na Figura 2-13 podemos ver que uma atmosfera não-turbulenta pode ser vista como uma série de camadas de gases, cada uma delas com uma densidade um pouco diferente. Toda vez que a energia propaga-se através da atmosfera por uma distância apreciável num ângulo diferente do vertical, ocorre refração.

Criação de Luz a Partir de Partículas Atômicas numa Lâmpada de Vapor de Sódio

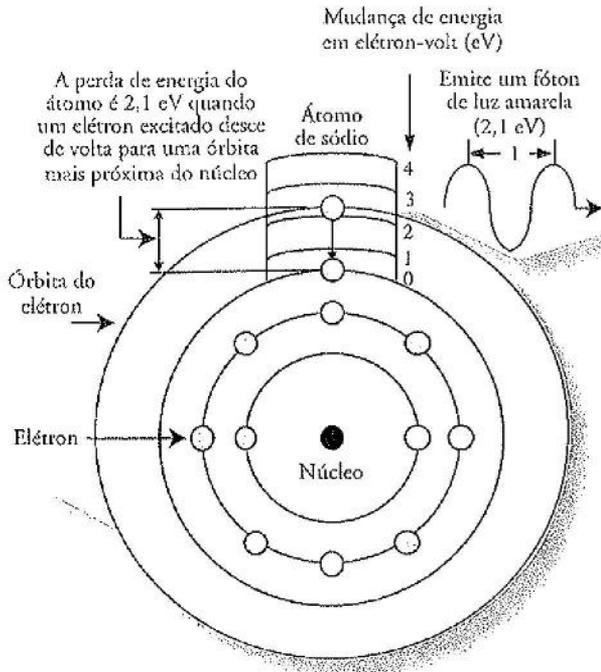


Figura 2-12 Criação de luz a partir de partículas atômicas numa lâmpada de vapor de sódio. Após ser energizado por vários milhares de volts de eletricidade, o elétron mais externo em cada átomo energizado do vapor de sódio sobe para um degrau mais alto na escada de energia e depois retorna a descida da escada numa certa sequência de degraus de uma maneira previsível. O dois últimos degraus na descendente são separados por 2,1 eV. Isso produz um fóton de luz amarela, o qual tem 2,1 eV de energia (veja Tabela 2-2).

A quantidade de refração é uma função do ângulo feito com a vertical (θ), da distância envolvida (na atmosfera, quanto maior a distância, maior a mudança na densidade), e da densidade do ar envolvido (o ar geralmente é mais denso próximo do nível do mar). Sérios erros de localização devidos à refração podem ocorrer em imagens formadas a partir da energia detectada em altas altitudes ou sob ângulos muito agudos. Entretanto, esses erros de localização são previstos pela lei de Snell e, portanto, podem ser removidos.

Observe que

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \quad (2-12)$$

Assim, se conhecermos o índice de refração dos meios n_1 e n_2 e o ângulo de incidência da energia no meio n_1 , é possível prever a quantidade de refração que ocorrerá ($\sin \theta_2$)

no meio n_2 usando relações trigonométricas. É interessante notar, porém, que a maioria dos analistas de imagens nunca se preocupa em computar o índice de refração.

Espalhamento

Um sério efeito da atmosfera é o espalhamento da radiação pelas partículas atmosféricas. O *espalhamento* difere da refração no sentido de que a direção associada ao espalhamento é imprevisível, enquanto a direção da refração (para resumir a definição) é previsível. Essencialmente, há três tipos de espalhamento: Rayleigh, Mie e espalhamento não-seletivo. As principais subdivisões da atmosfera e os tipos de moléculas e aerossóis encontrados em cada camada são mostrados na Figura 2-14 (Miller e Vermote, 2002). O tamanho relativo do comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente, do diâmetro dos gases, do vapor d'água, e/ou da poeira com os quais a energia interage, e o tipo de espalhamento que deverá ocorrer estão resumidos na Figura 2-15.

O *espalhamento Rayleigh* (frequentemente chamado de *espalhamento molecular*) ocorre quando o diâmetro efetivo da matéria (geralmente moléculas de ar, tais como oxigênio e nitrogênio na atmosfera) é muitas vezes menor (geralmente $<0,1$) que o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente (Figura 2-15a). O espalhamento Rayleigh é chamado assim em homenagem ao físico inglês Lord Rayleigh, que forneceu a primeira explicação coerente para ele. Todo espalhamento ocorre com absorção e re-emissão de radiação pelos átomos ou moléculas da maneira previamente descrita na seção sobre radiação das estruturas atômicas. É impossível prever a direção na qual um átomo ou molécula específicos emitirá um fóton, portanto espalhamento. A energia requerida para excitar um átomo está associada com a potente radiação de ondas curtas, de alta frequência.

A quantidade aproximada de espalhamento Rayleigh na atmosfera nos comprimentos de onda ópticos ($0,4 - 0,7 \mu\text{m}$) pode ser computada usando o algoritmo de espalhamento pela seção-transversal de Rayleigh (τ_m) (Cracknell e Hayes, 1983):

$$\tau_m = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N^2\lambda^4} \quad (2-13)$$

Onde n = índice de refração, N = número de moléculas de ar por unidade de volume, λ = comprimento de onda. A quantidade de espalhamento é inversamente relacionada à quarta potência do comprimento de onda da radiação. Por exemplo, a luz ultravioleta de $0,3 \mu\text{m}$ é espalhada aproximadamente 16 vezes mais do que a luz vermelha de $0,6 \mu\text{m}$, i.e., $(0,6/0,3)^4 = 16$. A luz azul de $0,4 \mu\text{m}$ é espalhada cerca de cinco vezes mais que a luz vermelha de

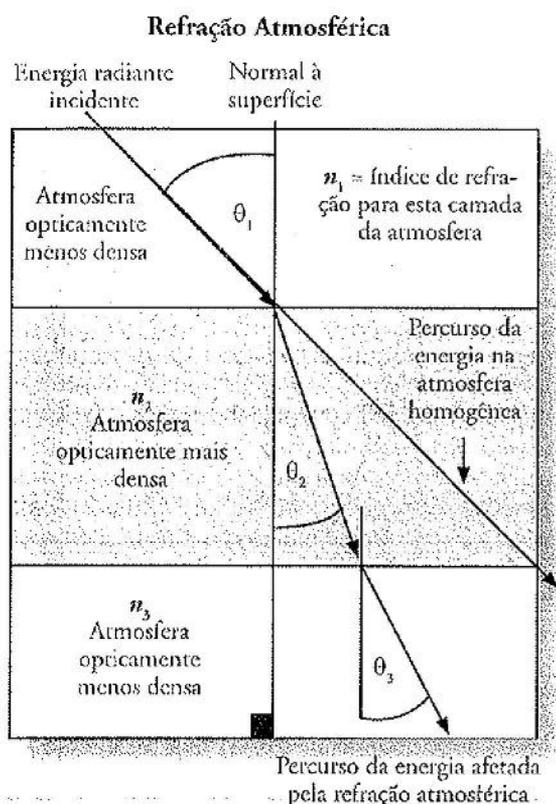


Figura 2-13 Refração em três camadas atmosféricas não-turbulentas. A energia incidente é desviada de sua trajetória normal quando se desloca de uma camada atmosférica para outra. A lei de Snell pode ser usada para prever quanto desvio ocorrerá, com base no ângulo de incidência (θ) e no índice de refração de cada nível atmosférico, n_1 , n_2 e n_3 .

$0,6 \mu\text{m}$, i.e., $(0,6/0,4)^4 = 5,06$. A quantidade de espalhamento Rayleigh esperada em todo o espectro visível ($0,4 - 0,7 \mu\text{m}$) é mostrada na Figura 2-16.

A maioria do espalhamento Rayleigh por moléculas de gás ocorre na atmosfera, de 2 a 8 km acima do solo (Figura 2-14). O espalhamento Rayleigh é responsável pela aparência azul do céu. Os comprimentos de onda mais curtos do violeta e azul são mais eficientemente espalhados que os comprimentos de onda maiores do laranja e do vermelho. Quando olhamos para cima num dia sem nuvens e admiramos o céu azul, estamos testemunhando o espalhamento preferencial dos menores comprimentos de onda da luz solar. O espalhamento Rayleigh também é responsável pelo vermelho do pôr do Sol. Como a atmosfera é uma fina concha de ar que cerca gravitacionalmente a Terra sólida, a luz solar é obrigada a passar por um caminho inclinado mais longo de ar ao entardecer (e ao amanhecer) do que ao meio dia. Uma vez que os comprimentos de onda do

Camadas e Constituintes Atmosféricos

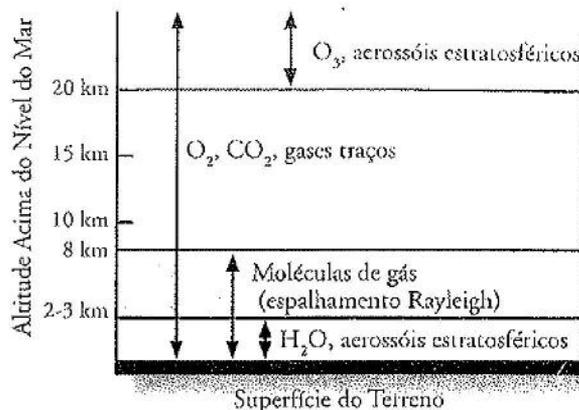


Figura 2-14 Principais subdivisões da atmosfera e os tipos de moléculas e aerossóis encontrados em cada camada (adaptado de Miller e Vermote, 2002).

violeta e do azul são espalhados ainda mais durante os seus agora longos percursos através do ar que quando o Sol está a pino, o que vemos quando olhamos em direção ao pôr do Sol é o resíduo – os comprimentos de onda da luz solar que dificilmente são espalhados, especialmente os referentes ao laranja e vermelho.

O espalhamento Mie (às vezes denominado de não-molecular ou por partículas de aerossóis) ocorre nos 4,5 km inferiores da atmosfera, onde podem estar muitas partículas essencialmente esféricas com diâmetros aproximadamente iguais ao tamanho do comprimento de onda da energia incidente (Figura 2-15b). O tamanho real das partículas pode variar de 0,1 a 10 vezes o comprimento de onda da energia incidente. Para a luz visível, os principais agentes de espalhamento são a poeira e outras partículas variando de poucos décimos de micrômetro a vários micrômetros em diâmetro. A magnitude desse espalhamento é maior que a do espalhamento Rayleigh, e os comprimentos de onda espalhados são maiores. Quanto maior a quantidade de partículas de fumaça e de poeira na coluna atmosférica, mais a luz violeta e azul será removida e apenas os comprimentos de onda maiores de luz laranja e vermelha atingirão nossos olhos. A poluição também contribui para belos amanheceres e entardeceres.

O espalhamento não-seletivo ocorre nas porções mais baixas da atmosfera, onde há partículas >10 vezes o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente (Figura 2-15c). Este tipo de espalhamento é não-seletivo, i.e., todos os comprimentos de onda são espalhados, e não apenas o azul, verde, ou vermelho. Assim, as gotículas de água e os cristais de gelo que formam as nuvens e os nevoeiros espalham todos os comprimentos de onda da luz visível igual-

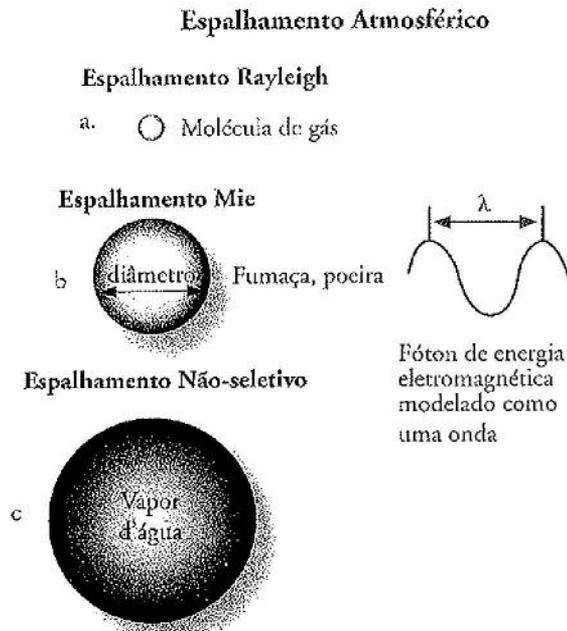


Figura 2-15 O tipo de espalhamento é uma função do 1) comprimento de onda da energia radiante incidente e 2) tamanho da molécula de gás, partícula de poeira, e/ou gotículas de vapor d'água encontradas.

mente bem, fazendo com que a nuvem pareça branca. O espalhamento não-seletivo de aproximadamente iguais proporções de luz azul, verde e vermelha sempre aparece como luz branca ao observador comum. Esta é a razão porque ao usarmos a luz alta do nosso veículo durante um nevoeiro apenas torna pior o problema, pois espalhamos não-seletivamente ainda mais luz no nosso campo de visada.

O espalhamento é uma consideração muito importante em pesquisas em sensoriamento remoto. Ele pode reduzir severamente o conteúdo de informação dos dados de sensoriamento remoto até o ponto que a imagem perde contraste e torna-se difícil diferenciar um objeto de outro.

Absorção

Absorção é o processo pelo qual a energia radiante é absorvida e convertida em outras formas de energia. A absorção da energia radiante incidente ocorre na atmosfera ou no terreno. Uma *banda de absorção* é um intervalo de comprimentos de onda (ou frequências) do espectro eletromagnético no qual a energia radiante é absorvida por uma substância. Os efeitos da água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2), ozônio (O_3) e óxido nítrico (N_2O) sobre a transmissão da luz através da atmosfera estão resumidos na Figura 2-17a. O efeito cumulativo da absorção pelos vários

Intensidade do Espalhamento Rayleigh Varia Inversamente com λ^{-4}

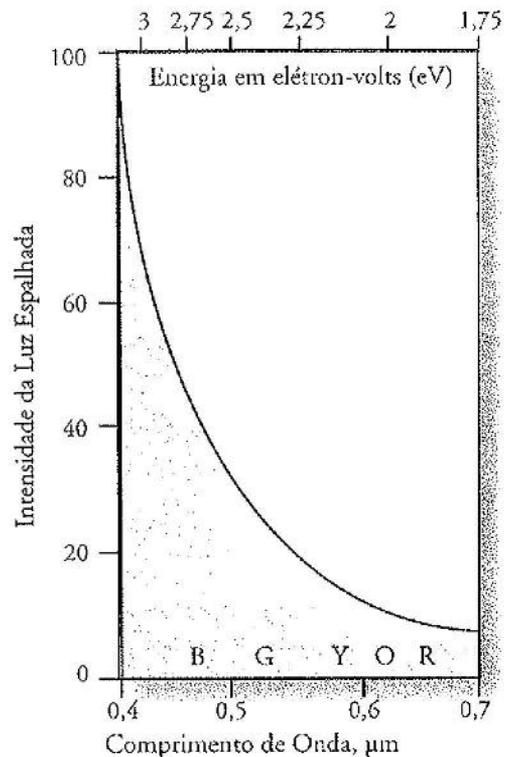


Figura 2-16 A intensidade do espalhamento Rayleigh varia inversamente com a quarta potência do comprimento de onda (λ^{-4}).

constituintes pode fazer com que a atmosfera se "feche" completamente em certas regiões do espectro. Isso é ruim para o sensoriamento remoto porque nenhuma energia fica disponível para ser registrada por sensoriamento remoto. Por outro lado, na porção visível do espectro eletromagnético (0,4 – 0,7 μm), a atmosfera não absorve toda a energia incidente, mas a transmite efetivamente bem. Porções do espectro que transmitem a energia radiante com eficiência são chamadas de *janelas atmosféricas*.

A absorção ocorre quando a energia incidente de mesma frequência que a frequência ressonante de um átomo ou molécula é absorvida, produzindo um estado excitado. Se ao invés de irradiar um fóton do mesmo comprimento de onda, a energia for transformada em calor e for subsequentemente irradiada num comprimento de onda maior, ocorre absorção. Quando se trata de um meio como o ar, a absorção e o espalhamento são frequentemente combinados num *coeficiente de extinção* (Konecny, 2003). A

transmissão é inversamente relacionada ao coeficiente de extinção e à espessura da camada. Certos comprimentos de onda da radiação são mais afetados pela absorção do que pelo espalhamento. Isso é particularmente verdade para o infravermelho e para os comprimentos de onda menores do que a luz visível. Os efeitos combinados de absorção, espalhamento e reflectância (dos topos das nuvens) atmosféricos podem reduzir dramaticamente a quantidade de radiação solar atingindo a superfície da Terra ao nível do mar, como mostrado na Figura 2-17b.

A clorofila na vegetação absorve muito da luz azul e vermelha incidente para fins de fotossíntese. O Capítulo 10 descreve a importância dessas bandas de absorção da clorofila e seus papéis durante o sensoriamento remoto da vegetação. Similarmente, a água é um excelente absorvedor de energia (Capítulo 11). Muitos minerais têm características únicas de absorção em porções muito específicas do espectro eletromagnético que nos permitem usar o sensoriamento remoto para identificá-los (Capítulo 13), assumindo que não haja vegetação sobrejacente (Clark, 1999).

A energia que atinge o sistema de sensoriamento remoto deve passar pela atmosfera duas vezes. Assim, é comum identificar dois *coeficientes de transmissão atmosférica*: um para a energia chegando à atmosfera (T_{0p}) num ângulo de incidência relacionado à fonte de energia (p.ex., o Sol), e um para a energia refletida ou emitida pela superfície da Terra que deve passar pela atmosfera para atingir o sistema sensor remoto (T_{0r}). Veremos o quanto esses dois parâmetros são importantes na discussão sobre correção atmosférica, posteriormente neste capítulo.

Reflectância

A *reflectância* é o processo pelo qual a radiação “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d’água, ou um solo exposto. Verdadeiramente, o processo é mais complicado, envolvendo re-radiação de fótons em uníssono por átomos ou moléculas numa camada de aproximadamente metade do comprimento de onda em profundidade. A reflexão exibe características fundamentais que são importantes no sensoriamento remoto. Primeiro, a radiação incidente, a radiação refletida, e uma vertical à superfície a partir da qual os ângulos de incidência e reflexão são medidos, todos ficam no mesmo plano. Segundo, o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão (exitância) são aproximadamente iguais, como mostrado na Figura 2-18.

Há vários tipos de superfícies refletoras. A *reflexão especular* ocorre quando a superfície a partir da qual a radiação é refletida é essencialmente lisa (i.e., a altura média do perfil da superfície é várias vezes menor que o comprimento de

onda da radiação que está atingindo a superfície). Várias feições, como corpos d’água calmos, atuam como *refletores especulares quase perfeitos* (Figura 2-18a,b). Se houver muito poucas ondulações na superfície, a energia incidente deixará a superfície do corpo d’água num ângulo igual e oposto ao da energia incidente. Sabemos que isso ocorre pela nossa própria experiência. Se à noite iluminarmos com um farolete um lago tranquilo, a luz irá resvalar na superfície e atingir as árvores na outra margem num ângulo igual e oposto ao da radiação incidente.

Se a superfície tem uma grande altura superficial (rugosa) relativamente ao tamanho do comprimento de onda da energia incidente, os raios refletidos vão em muitas direções, dependendo da orientação das superfícies refletoras menores. Esta *reflexão difusa* não produz uma imagem espelho, mas sim uma radiação difusa (Figura 2-18c). Papel branco, pó branco, e outros materiais refletem a luz visível desta maneira difusa. Se a superfície for muito rugosa, então pode ocorrer um espalhamento imprevisível. Lambert definiu uma superfície perfeitamente difusa; assim, a comumente chamada *superfície Lambertiana* é aquela na qual o fluxo radiante que deixa a superfície é constante para qualquer ângulo de reflectância (Figura 2-18d).

A maior parte do fluxo radiante incidente é refletida pelo topo das nuvens e outros materiais na atmosfera. Uma quantidade substancial dessa energia é rerradiada de volta para o espaço. Como veremos, os princípios da reflexão especular e difusa que se aplicam às nuvens também se aplicam ao terreno.

A reflectância espectral pode ser medida a grandes distâncias usando sistemas multispectrais de sensoriamento remoto. Os sistemas ópticos de sensoriamento remoto que registram a reflectância espectral são apresentados resumidamente nos Capítulos 4 e 7. Também é possível obter medições de reflectância espectral do terreno (p.ex., culturas agrícolas, solo e água) segurando um espectrorradiômetro a apenas poucos centímetros acima do solo como mostrado na Figura 1-1. Os métodos de obtenção de medidas de reflectância espectral *in situ* estão apresentados no Capítulo 15.



Interações Energia-Matéria no Terreno

A taxa temporal do fluxo de energia em direção a, para fora de, ou através de uma superfície é chamada de *fluxo radiante* (Φ) e é medida em watts (W) (Tabela 2-4). As características do fluxo radiante e o que acontece com ele quando interage com a superfície da Terra é de importância crucial no sensoriamento remoto. De fato, este é o foco fundamental da maioria das pesquisas em sensoriamento remoto. Pelo monitoramento cuidadoso da natureza exata

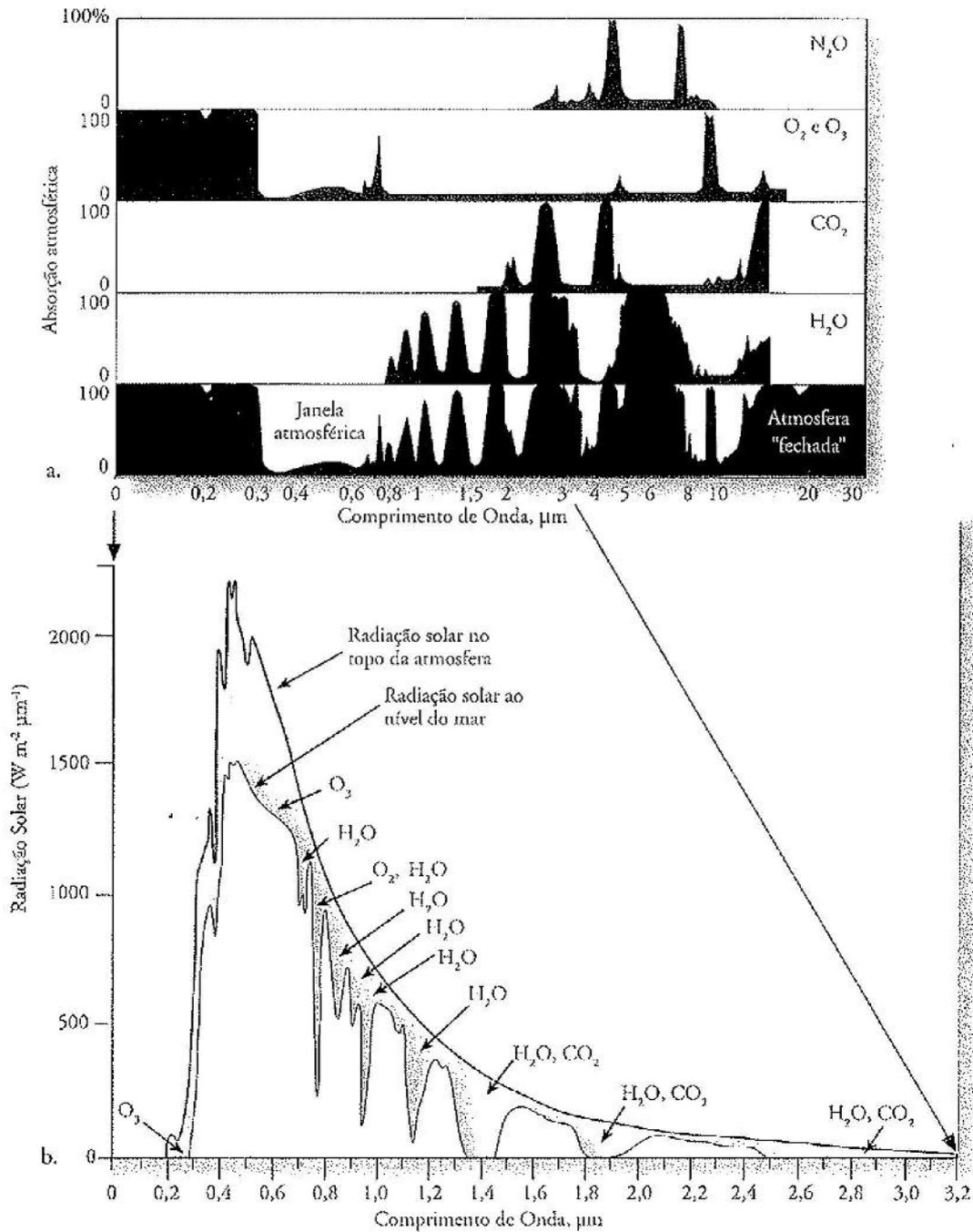


Figura 2-17 a) Absorção da energia eletromagnética do Sol incidente na região de 0,1 a 3,0 μm por vários gases atmosféricos. Os primeiros quatro gráficos mostram as características de absorção do N_2O , O_2 e O_3 , CO_2 e H_2O , enquanto o último gráfico mostra o resultado acumulado de todos esses constituintes estando na atmosfera ao mesmo tempo. A atmosfera essencialmente "se fecha" em certas porções do espectro, enquanto "janelas atmosféricas" existem em outras regiões, as quais efetivamente transmitem energia ao terreno. São nessas janelas que os sistemas de sensoriamento remoto devem funcionar. b) O efeito combinado da absorção, espalhamento e reflectância atmosféricos reduzem a quantidade de irradiância solar que atinge a superfície da Terra ao nível do mar.

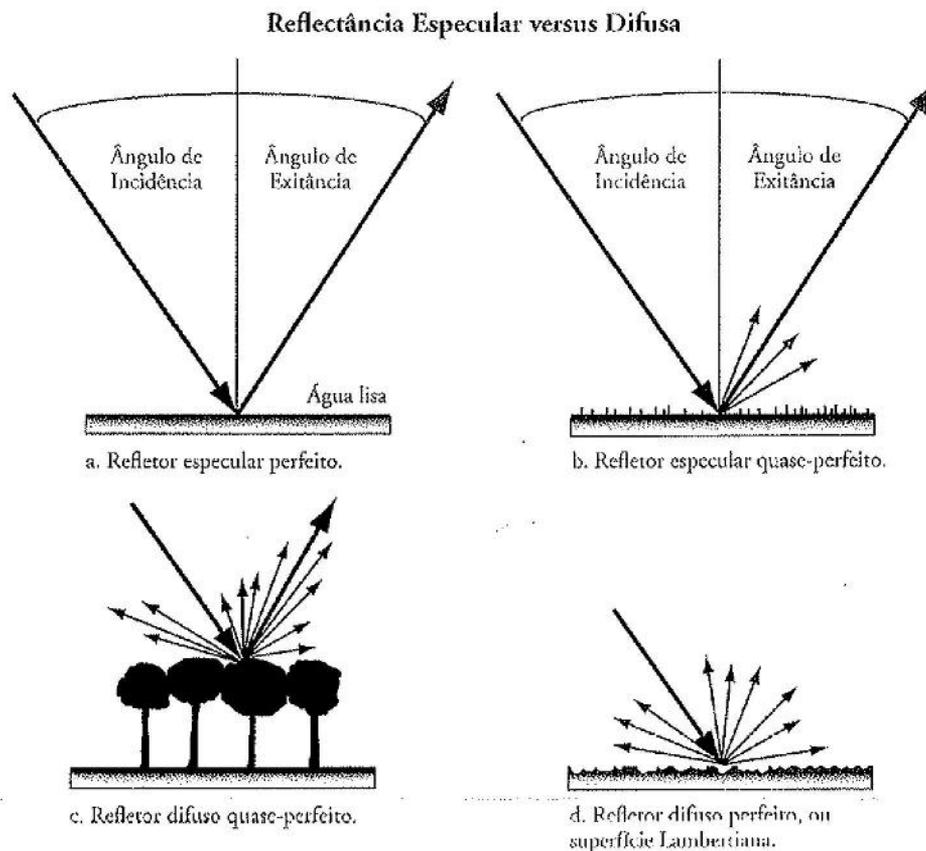


Figura 2-18 A natureza da reflectância especular e difusa.

do fluxo radiante que chega (incidente) em comprimentos de onda selecionados e como ele interage com o terreno, é possível obter importantes informações sobre o terreno.

Foram identificadas grandezas radiométricas que permitem ao analista manter um registro cuidadoso do fluxo radiante incidente ou emergente (Tabela 2-4). Começamos com a simples equação do balanço de radiação, que estabelece que a quantidade total de fluxo radiante em comprimentos de onda específicos (λ) incidente no terreno (Φ_λ) deve ser balanceada pela avaliação da quantidade de fluxo radiante refletido pela superfície ($\Phi_{\text{refletido}\lambda}$), quantidade de fluxo radiante absorvido pela superfície ($\Phi_{\text{absorvido}\lambda}$), e quantidade de fluxo radiante transmitido pela superfície ($\Phi_{\text{transmitido}\lambda}$):

$$\Phi_\lambda = \Phi_{\text{refletido}\lambda} + \Phi_{\text{absorvido}\lambda} + \Phi_{\text{transmitido}\lambda} \quad (2-14)$$

É importante notar que essas grandezas radiométricas são baseadas na quantidade de energia radiante incidente numa superfície em qualquer ângulo num hemisfério (i.e., metade de uma esfera).

Reflectância, Absortância e Transmitância

A *reflectância hemisférica* (ρ_λ) é definida como a razão adimensional entre o fluxo radiante refletido por uma superfície e o fluxo radiante incidente nela (Tabela 2-4):

$$\rho_\lambda = \frac{\Phi_{\text{refletido}\lambda}}{\Phi_\lambda} \quad (2-15)$$

A *transmitância hemisférica* (τ_λ) é definida como a razão adimensional entre o fluxo radiante transmitido por (através de) uma superfície e o fluxo radiante incidente nela

$$\tau_\lambda = \frac{\Phi_{\text{transmitido}\lambda}}{\Phi_\lambda} \quad (2-16)$$

A *absortância hemisférica* (α_λ) é definida pela relação adimensional:

$$\alpha_\lambda = \frac{\Phi_{\text{absorvido}\lambda}}{\Phi_\lambda} \quad (2-17)$$

Tabela 2-4. Conceitos radiométricos (Colwell, 1983).

Nome	Símbolo	Unidades	Conceito
Energia radiante	Q_λ	joules, J	Capacidade de a radiação, numa banda espectral específica, realizar trabalho.
Fluxo radiante	Φ_λ	watts, W	Taxa temporal do fluxo de energia em direção λ , emergente da, ou através da superfície.
Densidade de fluxo radiante na superfície			
Irradiância	E_λ	watts por metro quadrado, $W m^{-2}$	Fluxo radiante incidente sobre a superfície por unidade de área da superfície.
Exitância radiante	M_λ	watts por metro quadrado, $W m^{-2}$	Fluxo radiante emergente da superfície por unidade de área da superfície.
Radiância	L_λ	watts por metro quadrado, por esterradiano, $W m^{-2} sr^{-1}$	Intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica.
Reflectância hemisférica	ρ_λ	adimensional	$\frac{\Phi_{\text{refletido}\lambda}}{\Phi_\lambda}$
Transmitância hemisférica	τ_λ	adimensional	$\frac{\Phi_{\text{transmitido}\lambda}}{\Phi_\lambda}$
Absortância hemisférica	α_λ	adimensional	$\frac{\Phi_{\text{absorvido}\lambda}}{\Phi_\lambda}$

ou

$$\alpha_\lambda = 1 - (\rho_\lambda + \tau_\lambda). \quad (2-18)$$

Essas definições implicam que a energia radiante deve ser conservada, i.e., ela é refletida de volta por reflexão, transmitida através de um material, ou absorvida e transformada em alguma outra forma de energia no interior dos componentes do terreno. O efeito líquido da absorção de radiação pela maioria das substâncias é que a energia é convertida em calor, causando um subsequente aumento da temperatura da substância.

Essas grandezas radiométricas são úteis na produção de afirmações gerais sobre as características de reflectância, transmitância e absorptância das feições do terreno. De fato, se tomarmos a simples equação da reflectância hemisférica

e a multiplicarmos por 100, obtemos uma expressão para a reflectância em percentagem ($\rho_{\lambda\%}$):

$$\rho_{\lambda\%} = \frac{\Phi_{\text{refletido}\lambda}}{\Phi_\lambda} \times 100, \quad (2-19)$$

que é frequentemente usada na pesquisa em sensoriamento remoto para descrever as características de reflectância espectral de vários fenômenos. Exemplos de curvas de reflectância espectral percentual para fenômenos urbano-periurbanos selecionados são mostrados na figura 2-19. As curvas de reflectância espectral não fornecem nenhuma informação sobre a absorção e transmitância da energia radiante. Mas porque muitos dos sistemas sensores, como câmeras e alguns escâneres multiespectrais, registram apenas a energia refletida, esta informação ainda é de grande utilidade e pode formar a base para a avaliação e identificação do objeto.

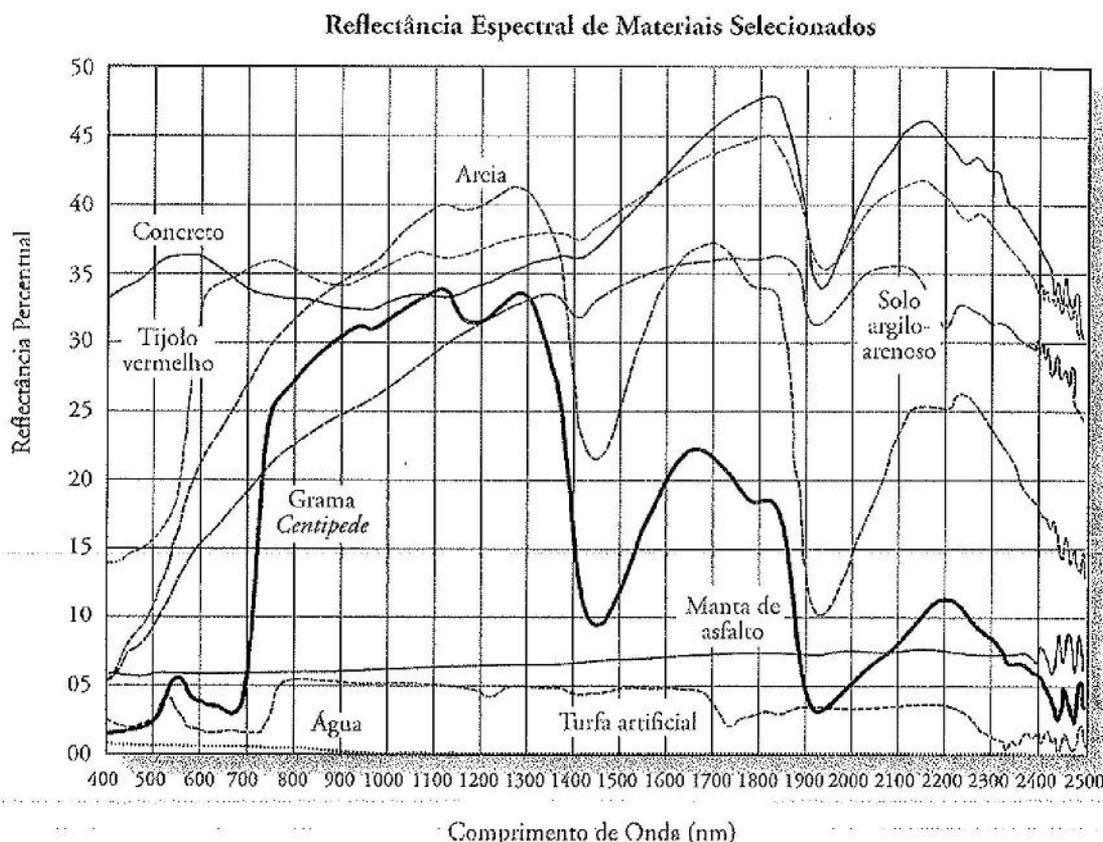


Figura 2-19 Curvas de reflectância espectral para fenômenos urbano-periurbanos na região espectral 400 - 2.500 nm obtidas usando um espectrorradiômetro portátil (o Capítulo 15 descreve como as medidas de reflectância espectral *in situ* são coletadas).

Por exemplo, é claro a partir da Figura 2-19 que a grama *Centipede* reflete apenas cerca de 3 a 4 por cento da energia radiante incidente no vermelho (0,6 - 0,7 μm), enquanto reflete até aproximadamente 35 por cento do fluxo radiante incidente no infravermelho próximo (0,7 - 0,9 μm). Se queremos discriminar entre grama e turfa artificial, a porção ideal do espectro para o sensoriamento remoto é a região do infravermelho próximo, pois a turfa artificial reflete apenas cerca de 5 por cento da energia incidente no infravermelho próximo. Isso faria com que uma imagem infravermelho preto-e-branco do terreno mostrasse a grama *Centipede* em tons brilhantes e a turfa artificial em tons mais escuros.

As grandezas reflectância, transmitância e absorptância hemisféricas não fornecem informações sobre a quantidade exata de energia atingindo uma área específica no terreno proveniente de uma direção específica ou sobre a quantidade exata de fluxo radiante emergindo do terreno numa certa direção. Os sistemas de sensoriamento remoto podem ficar posicionados num ponto do espaço durante apenas um ponto único no tempo, e geralmente observam uma pequena porção da Terra num certo instante. Portanto, é

importante refinarmos nossas técnicas de medição radiométrica de tal forma que informações radiométricas mais precisas possam ser extraídas dos dados de sensoriamento remoto (Du et al., 2002). Isso requer a introdução de diversas grandezas radiométricas que fornecem informações radiométricas gradativamente mais precisas.

Densidade de Fluxo Radiante

Uma área plana (p.ex., com dimensões de 1 x 1 m) sendo iluminada pelo Sol com um fluxo radiante (Φ) em comprimentos de onda específicos (λ) é mostrada na Figura 2-20. A quantidade de fluxo radiante interceptado dividida pela área da superfície plana é a *densidade de fluxo radiante* média.

Irradiância e Exitância

A quantidade de fluxo radiante incidente sobre uma superfície por unidade de área da superfície é chamada de *irradiância* (E_p):

$$E_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{A} \quad (2-20)$$

A quantidade de fluxo radiante que emerge de uma superfície por unidade de área da superfície é chamada de *exitância* (M_{λ}):

$$M_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{A} \quad (2-21)$$

Ambas as grandezas são geralmente medidas em Watts por metro quadrado (W m^{-2}). Embora não tenhamos informação da direção, seja da energia incidente seja da emergente (i.e., a energia pode chegar e sair em qualquer ângulo de todo o hemisfério), temos que refinar a medida para incluir informação sobre o tamanho da área de estudo de interesse no solo em m^2 . Após isso, precisamos refinar nossas técnicas de medição radiométrica para incluir informação sobre qual direção o fluxo radiante deixará a área de estudo.

Radiância

A radiância é a medida radiométrica mais precisa em sensoriamento remoto. *Radiância* (L_{λ}) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica. É medida em Watts por metro quadrado por esterradiano ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$). O conceito de radiância é mais bem entendido pela análise da Figura 2-21. Primeiro, o fluxo radiante deixa a área-fonte projetada numa direção específica em direção ao sensor remoto. Não estamos preocupados com quaisquer outros fluxos radiantes que poderiam estar deixando a área-fonte em qualquer outra direção. Estamos interessados apenas no fluxo radiante em certos comprimentos de onda (Φ_{λ}) deixando a área-fonte projetada (A) numa certa direção ($\cos \theta$) e num ângulo sólido (Ω) (Milman, 1999):

$$L_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{A \cos \theta \Omega} \quad (2-22)$$

Uma maneira de visualizar o ângulo sólido é considerar o que você veria se estivesse num avião e olhasse com um telescópio para o solo. Apenas a energia que emergisse do terreno e viesse em direção ao telescópio num ângulo específico (medido em esterradianos) seria interceptado pelo telescópio e visto por seus olhos. Assim, o ângulo sólido é como um cone tridimensional (ou tubo) que afunila o fluxo radiante vindo de uma fonte pontual no terreno em direção ao sistema sensor. Espera-se que a energia proveniente da atmosfera ou de outras partes do terreno não seja espalhada para dentro do campo de visada do ângulo sólido e contamine o fluxo radiante proveniente da área de interesse no terreno. Infelizmente, com frequência não é isso o que ocorre, pois o espalhamento na atmosfera e em outras áreas

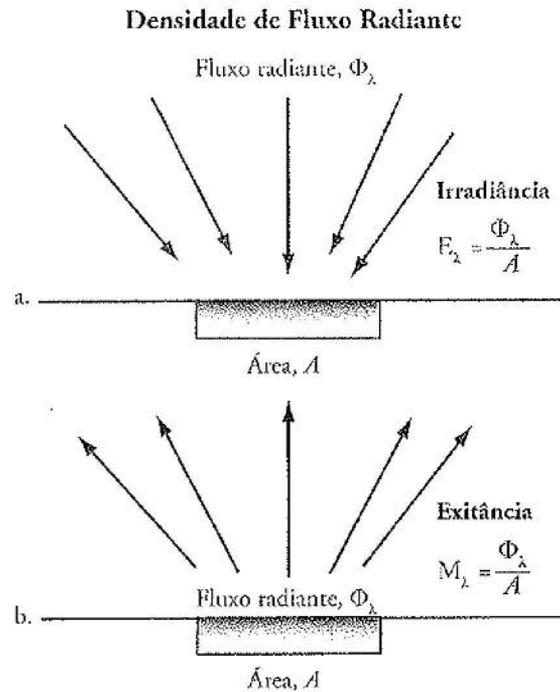


Figura 2-20 Conceito de densidade de fluxo radiante para uma área sobre a superfície da Terra. a) *Irradiância* é uma medida da quantidade de fluxo radiante incidente na superfície por unidade de área da superfície, medida em Watts por m^2 . b) *Exitância* é uma medida da quantidade de fluxo radiante deixando uma superfície por unidade de área da superfície, medida em Watts m^{-2} .

próximas no terreno pode contribuir com energia espectral espúria, que entra no campo de visada do ângulo sólido.



Interações Energia-Matéria na Atmosfera

O fluxo radiante refletido ou emitido pela superfície da Terra entra novamente na atmosfera, onde interage com vários gases, vapor d'água e particulados. Assim, o espalhamento, a absorção, a reflexão e a refração atmosféricas influenciam o fluxo radiante uma vez mais antes que a energia seja registrada pelo sistema de sensoriamento remoto.



Interações Energia-Matéria no Sensor

Finalmente, interações energia-matéria ocorrem quando a energia atinge o sensor remoto. Se uma câmera aérea estiver sendo usada, então a radiância interagirá com o filtro, as lentes ópticas de vidro da câmera, e finalmente com a

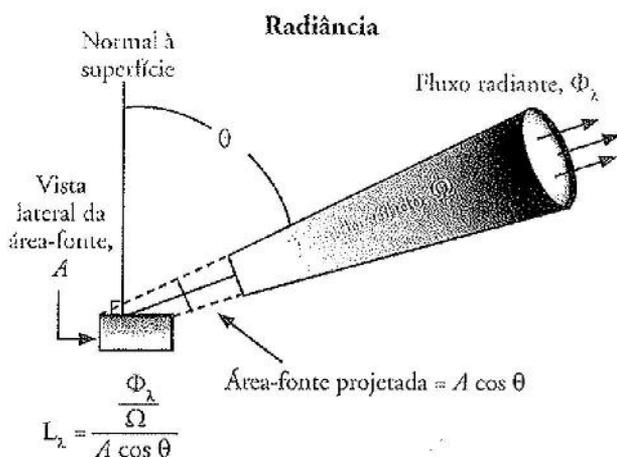


Figura 2-21 Conceito de radiância deixando uma área-fonte projetada específica no terreno, numa direção específica, e num ângulo sólido específico.

emulsão do filme com seus cristais de haleto de prata sensíveis à luz. A emulsão deve então ser revelada e impressa antes que uma cópia analógica seja disponível para análise. Ao invés de armazenar uma imagem latente no filme, um detector óptico-mecânico registrará digitalmente o número de fótons atingindo o sensor em regiões espectrais de comprimentos de onda muito específicos.

Alvo e Radiância de Trajetória

Idealmente, a radiância (L) registrada por uma câmera ou detector é uma função verdadeira da quantidade de radiância emergindo do alvo no terreno dentro do campo de visada instantâneo (IFOV) num ângulo sólido específico, como discutido previamente. Infelizmente, outras energias radiantes provenientes de várias outras trajetórias podem adentrar no campo de visada e introduzir ruído/confusão no processo de sensoriamento remoto. Assim, definições de variáveis radiométricas adicionais são necessárias para identificar as principais fontes e trajetórias dessa energia (Cracknell e Hayes, 1993; Green, 2003). As variáveis estão sintetizadas na Tabela 2-5. As várias trajetórias e fatores que determinam a radiância atingindo um sensor remoto estão resumidos na Figura 2-22, incluindo:

- A trajetória 1 contém a irradiância espectral solar (E_{λ_0}) que foi muito pouco atenuada antes de iluminar o terreno contido no IFOV. Note neste caso que estamos interessados na irradiância solar proveniente de um ângulo zenital solar específico (θ_0) e que a quantidade de irradiância atingindo o terreno é uma função da

transmitância atmosférica neste ângulo (T_{θ_0}). Se toda a irradiância atinge o terreno, então a transmitância atmosférica (T_{θ_0}) é um. Se nenhuma irradiância atinge o terreno, então a transmitância atmosférica é zero.

- A trajetória 2 contém a irradiância espectral solar difusa ($E_{d\lambda}$) que nunca atinge a superfície da Terra (o alvo na área de estudo) por causa do espalhamento na atmosfera. Infelizmente, tal energia é frequentemente espalhada diretamente no IFOV do sistema sensor. Como discutido previamente, o espalhamento Rayleigh da luz azul contribui bastante para a irradiância solar difusa. É por causa disso que a imagem da banda azul produzida por um sistema sensor remoto frequentemente é mais clara que qualquer das outras bandas. Ela contém muito da irradiância solar difusa indesejável que foi espalhada inadvertidamente para o IFOV do sistema sensor. Assim, se possível, devemos minimizar esses efeitos. Green (2003) refere-se a essa grandeza como reflectância ascendente da atmosfera ($E_{u\lambda}$).
- A trajetória 3 contém a energia proveniente do Sol que sofreu algum espalhamento Rayleigh, Mie, e/ou espalhamento não-seletivo e talvez alguma absorção e re-emissão antes de iluminar a área de estudo. Assim, sua composição espectral e polarização pode ser um pouco diferente da energia que atinge o terreno segundo a trajetória 1. Green (2003) refere-se a esta grandeza como reflectância descendente da atmosfera ($E_{d\lambda}$).
- A trajetória 4 contém a radiação que foi refletida ou espalhada pelo terreno próximo (ρ_{λ_0}) coberto por neve, concreto, solo, água, e/ou vegetação para dentro do IFOV do sistema sensor. A energia não ilumina efetivamente a área de interesse. Portanto, se possível, deveríamos minimizar seus efeitos.
- A trajetória 5 é a energia que também foi refletida pelo terreno próximo para a atmosfera, mas que então foi espalhada ou refletida para a área de estudo.

Portanto, para um dado intervalo espectral no espectro eletromagnético (p.ex., λ_1 a λ_2 poderia ser 0,6 – 0,7 μm ou luz vermelha), a irradiância solar total atingindo a superfície da Terra, E_{λ} , é uma integração de vários componentes:

$$E_{\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (E_{\lambda_0} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda \quad (\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}) \quad (2-23)$$

Ela é uma função da irradiância solar espectral no topo da atmosfera (E_{λ_0}) multiplicada pela transmitância atmosférica (T_{θ_0}) num certo ângulo zenital solar (θ_0) mais a contribuição da irradiância solar difusa ($E_{d\lambda}$).

Tabela 2-5. Variáveis radiométricas usadas em sensoriamento remoto.

Variáveis Radiométricas	
E_0	= irradiância solar no topo da atmosfera ($W m^{-2}$)
$E_{0\lambda}$	= irradiância solar espectral no topo da atmosfera ($W m^{-2} \mu m^{-1}$)
E_d	= irradiância solar difusa ($W m^{-2}$)
$E_{d\lambda}$	= irradiância solar espectral difusa ($W m^{-2} \mu m^{-1}$)
E_{da}	= a reflectância ascendente da atmosfera
E_{dd}	= a reflectância descendente da atmosfera
E_s^B	= irradiância global incidente na superfície ($W m^{-2}$)
$E_{s\lambda}^B$	= irradiância global espectral incidente na superfície ($W m^{-2} \mu m^{-1}$)
τ	= espessura óptica atmosférica normal
T_θ	= transmitância atmosférica num ângulo θ com o zênite
θ_0	= ângulo zênital solar
θ_s	= ângulo de visada do sensor a bordo do satélite (ou ângulo de varredura)
μ	= $\cos \theta$
ρ_λ	= reflectância superficial do alvo num comprimento de onda específico
ρ_{λ_n}	= reflectância de uma área vizinha
L_s	= radiância total no sensor ($W m^{-2} sr^{-1}$)
L_r	= radiância total do alvo de interesse em direção ao sensor ($W m^{-2} sr^{-1}$)
L_i	= radiância intrínseca do alvo ($W m^{-2} sr^{-1}$) (i.e., o que um radiômetro portátil registraria no terreno sem a interferência da atmosfera)
L_p	= radiância de trajetória de múltiplos espalhadores ($W m^{-2} sr^{-1}$)

Apenas uma pequena quantidade desta irradiância é realmente refletida pelo terreno na direção do sistema sensor a bordo do satélite. Se assumirmos que a superfície da Terra seja um refletor difuso (uma superfície Lambertiana), a quantidade total de radiância emergindo do alvo da área de estudo (L_s) em direção ao sensor é:

$$L_s = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda T_{\theta_s} (E_{s\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda. \quad (2-24)$$

A reflectância média da superfície do alvo (ρ_λ) é incluída porque a vegetação, o solo, e a água dentro do IFOV absorvem seletivamente parte da energia incidente. Portanto, nem toda a energia incidente para o IFOV (E_s) emerge para o IFOV. Com efeito, o terreno atua como um filtro, absorvendo seletivamente certos comprimentos de onda da luz enquanto refletindo outros. Note que a energia emergindo do terreno está num ângulo (θ_s), requerendo o uso de um fator de transmitância atmosférica T_{θ_s} outra vez.

Seria maravilhoso se a radiância total registrada pelo sensor, L_s , se igualasse à radiância retornada do alvo em estudo na área de interesse, L_r . Infelizmente, $L_s \neq L_r$ porque há alguma radiância adicional de diferentes trajetórias que podem adentrar ao IFOV do detector do sistema sensor (Figura 2-22). Isso é geralmente chamado de *radiância de trajetória*, L_p . Assim, a radiância total registrada por um sensor torna-se:

$$L_s = L_r + L_p \quad (W m^{-2} sr^{-1}). \quad (2-25)$$

Vemos pela Equação 2-25 e Figura 2-22 que a radiância de trajetória (L_p) é um componente intrusivo (mau) na quantidade total de radiância registrada pelo sistema sensor (L_s). Ela é composta de energia radiante proveniente primariamente da irradiância solar difusa (E_d) da trajetória 2 e também da reflectância de áreas do terreno próximas (ρ_{λ_n}) da trajetória 4. A radiância de trajetória introduz erros no processo de coleta de dados por sensoriamento remoto. Ela pode impedir-nos de obter medidas espectrais exatas.

Uma grande quantidade de trabalhos foi feita para desenvolver métodos de remoção da contribuição da radiância de trajetória (L_p). Os métodos para computar a radiância de trajetória estão sumarizados em Richards e Jia (1999). Programas de modelos de transferência radiativa como o MODTRAN, o Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), e outros podem ser usados para prever a radiância de trajetória num dia particular para uma particular área de estudo (p.ex., Matthew et al., 2000; InSpec, 2002; Vermote et al., 2002). Tal informação pode então ser usada para remover a contribuição da radiância de trajetória (L_p) para o sinal de sensoriamento remoto (L_s) (p.ex., Research Systems, 2003; Green, 2003). Song et al. (2001) e Jensen (2005) fornecem informação sobre quando e como remover os efeitos deletérios da radiância de trajetória. O processo é comumente chamado de correção radiométrica.

Os métodos de coleta de medidas de reflectância espectral *in situ* que podem ser usadas para corrigir atmosféricamente os dados de sensoriamento remoto são apresentados no Capítulo 15.

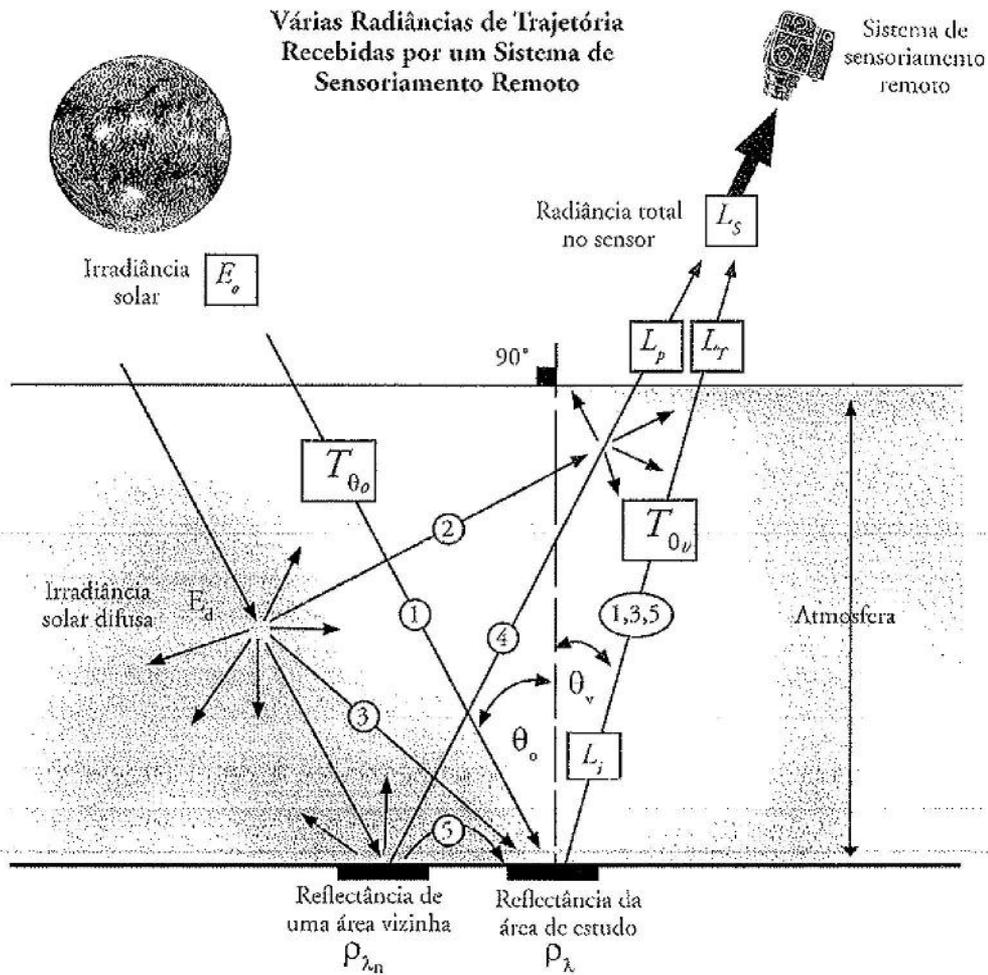


Figura 2-22 As radiâncias (L_j) das trajetórias 1, 3 e 5 contêm informação espectral intrínseca importante sobre o alvo de interesse. Por outro lado, a radiância de trajetória (L_p) das trajetórias 2 e 4 incluem irradiância solar difusa ou radiância de áreas vizinhas no terreno. Esta radiância de trajetória geralmente introduz ruído radiométrico indesejável nos dados de sensoriamento remoto e complica o processo de interpretação de imagens.



Referências

Colwell, R. N., (Ed.), 1983, *Manual of Remote Sensing*, 2nd ed., Bethesda: ASP&RS, 2440 p.

Cracknell, A. P. and L. W. Haycs, 1993, "Atmospheric Corrections to Passive Satellite Remote Sensing Data," Chapter 8 in *Introduction to Remote Sensing*, NY: Taylor & Francis, 116-158.

Du, Y., Teillet, P. M. and J. Cihlar, 2002, "Radiometric Normalization of Multitemporal High-resolution Satellite Images with Quality Control for Land Cover Change Detection," *Remote Sensing of Environment*, 82:123.

Englert, B., Scully, M. O. and H. Walther, 1994, "The Duality in Matter and Light," *Scientific American*, 271(6):86-92.

Feinberg, G., 1985, "Light," in R. K. Holz (Ed.), *The Surveillance Science: Remote Sensing of the Environment*, 2nd Ed., NY: John Wiley, 2-11.

Green, R. O., 2003, "Introduction to Atmospheric Correction," Chapter 2 in *ACORN Tutorial*, Boulder: Analytical Imaging and Geophysics, LLC, 12-18.

InSpec, 2002, *ACORN 4.0 User's Guide*, Boulder: Analytical Imaging and Geophysics, LLC, 76 p.

Jensen, J.R., 2005, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 525 p.

- Konecny, G., 2003, *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and GIS*, N.Y.: Taylor & Francis, 248 p.
- Matthew, M. W. and 13 co-authors, 2000, "Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm," *SPIE Proc. Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI*, 4049:199–207.
- Miller, S. W. and E. Vermote, 2002, *NPOESS Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite: Algorithm Theoretical Basis Document*, Version 5, Lanham: Raytheon, 83 p.
- Milman, A. S., 1999, *Mathematical Principles of Remote Sensing: Making Inferences from Noisy Data*, Ann Arbor: Ann Arbor Press, 37 p.
- Nassau, K., 1983, *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color*, NY.: John Wiley. Nassau, K., 1984, "The Physics of Color," in *Science Year 1984*, Chicago: World Book, 126–139.
- Research Systems, 2003, *FLAASH—Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*, Boulder: Research Systems, <http://www.rsinc.com/envi/flaash.asp>.
- Richards, J. A. and X. Jia, 1999, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, N.Y.: Springer-Verlag, 363 p.
- Rinker, J. N., 1999, *Introduction to Spectral Remote Sensing*, Alexandria: U.S. Army Topographic Engineering Center, <http://www.tec.army.mil/terrain/deser/tutorial>.
- Rott, H., 2000, "Physical Principles and Technical Aspects of Remote Sensing," in Schultz, G. A. and E. T. Engman (Eds.), *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, Berlin: Springer, 16–39.
- Song, C., Woodcock, C. E., Soto, K. C., Lenney, M. P. and S. A. Macomber, 2001, "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?" *Remote Sensing of Environment*, 75:230–244.
- Trefil, J. and R. M. Hazen, 1995, *The Sciences: An Integrated Approach*, NY.: John Wiley, 634 p.
- Tuominen, S. and A. Pekkarinen, 2004, "Local Radiometric Correction of Digital Aerial Photographs for Multi Source Forest Inventory," *Remote Sensing of Environment*, 89:72–82.
- Vermote, E. F., El Saleous, N. Z. and C. O. Justice, 2002, "Atmospheric Correction of MODIS Data in the Visible to Middle Infrared: First Results," *Remote Sensing of Environment*, 83:97–111.