

# Grandezas radiométricas

## 1.1 Radiação e o espectro eletromagnético

Todo corpo com temperatura maior que o zero absoluto (0 K) emite radiação em diferentes comprimentos de onda. Define-se como radiação a emissão ou propagação de energia na forma de onda eletromagnética. Essa energia é transferida por meio de unidades discretas denominadas *quanta* ou fótons. A energia ( $Q$ ) de um fóton está relacionada com seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) ou sua frequência de oscilação ( $\nu$ ) por:

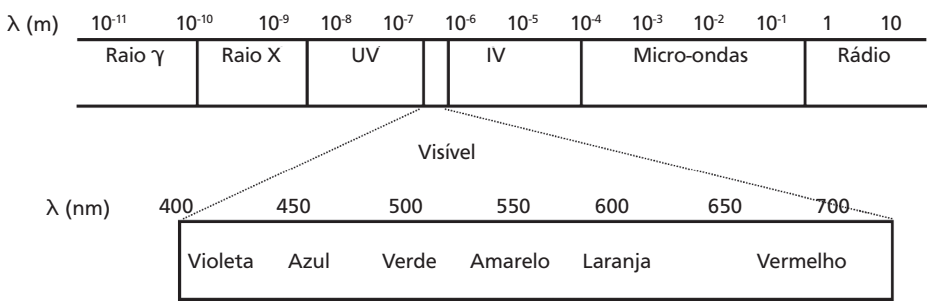
$$Q = hc / \lambda = h\nu \quad (1.1)$$

em que  $h$  é a constante de Planck ( $= 6,626 \times 10^{-34}$  Js), e  $c$ , a velocidade da luz ( $\approx 2,998 \times 10^8$  ms<sup>-1</sup> no vácuo), sendo  $Q$  expresso em joules (J) (o Sistema Internacional, SI, é utilizado para indicar as unidades das grandezas radiométricas, exceto nas definições de grandezas espectrais).

O Sol emite energia em praticamente todo o conjunto do espectro eletromagnético (Fig. 1.1). No entanto, a Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) considera como radiação óptica a radiação eletromagnética entre as regiões de transição dos raios X ( $\lambda \approx 1$  nm) e das ondas de rádio ( $\lambda \approx 1$  mm) (as unidades de comprimento de onda comumente utilizadas são o nanômetro, em que  $1$  nm =  $10^{-9}$  m, e o micrômetro, em que  $1$   $\mu$ m =  $10^{-6}$  m; em Astrofísica, também se utiliza o ângström, sendo  $1$  Å =  $10^{-10}$  m). A luz, ou *radiação visível*, é a denominação dada para a radiação percebida pelos seres humanos. O termo *luz* muitas vezes é usado para radiação em outros comprimentos de onda, o que não é recomendado pela CIE. Sendo assim, a luz, ou radiação visível, é definida como qualquer radiação capaz de causar diretamente uma sensação visual.

Não existem limites precisos para o intervalo espectral da radiação visível, uma vez que dependem da potência radiante que atinge a retina e também da sensibilidade do observador. Geralmente, o limite inferior do intervalo está

entre os comprimentos de onda de 360 nm e 400 nm, e o limite superior, entre 760 nm e 830 nm. Esse intervalo espectral, especificamente entre 400 nm e 700 nm, é denominado radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês *photosynthetically active radiation*), por ser a região espectral da radiação solar utilizada pelas plantas para realizar fotossíntese.



**Fig . 1.1** Esquema das várias regiões do espectro eletromagnético, de acordo com o comprimento de onda da radiação

As radiações ultravioleta (R-UV) e infravermelha (R-IV) correspondem, respectivamente, aos intervalos espectrais imediatamente inferiores e superiores à radiação visível. A R-UV compreende a radiação com comprimentos de onda entre 100 nm e 400 nm, e a R-IV, a radiação com comprimentos de onda entre 780 nm e  $10^6$  nm (1 mm). A R-UV está relacionada a uma série de efeitos fotobiológicos e fotoquímicos importantes para a presença da vida na Terra e para a composição da atmosfera. Com o intuito de facilitar o estudo desses efeitos, separa-se essa radiação em três sub-bandas espectrais, denominadas UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) e UVC (100-280 nm). Já a R-IV é fundamental para os balanços de energia no sistema Terra-atmosfera por ser fortemente absorvida e emitida por diversos gases que compõem a atmosfera terrestre. Geralmente, é subdividida em duas bandas, denominadas IV próximo (780-3.500 nm) e IV térmico (3.500 nm-1 mm). No entanto, de modo semelhante à R-UV, também pode ser subdividida em três bandas, IVA (780-1.400 nm), IVB (1.400-3.000 nm) e IVC (3.000 nm-1 mm).

Apesar de o Sol emitir radiação em quase todos os comprimentos de onda, a radiação solar consiste basicamente em radiações ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Apenas cerca de 1% dessa radiação é formada por raios X, raios  $\gamma$ , infravermelho térmico, micro-ondas e ondas de rádio.

A radiação solar está confinada majoritariamente na região espectral  $\lambda < 4 \mu\text{m}$  e é, por esse motivo, denominada radiação de onda curta. Já a radia-

ção emitida por corpos terrestres, como a superfície e a atmosfera, compreende predominantemente a região espectral  $\lambda \geq 4 \mu\text{m}$  e é chamada de radiação de onda longa ou térmica. Como será visto no Cap. 2, essas emissões em diferentes comprimentos de onda estão relacionadas às temperaturas dos emissores.

## 1.2 Ângulo sólido

Em um espaço bidimensional, um ângulo plano ( $\alpha$ ) corresponde a um arco de comprimento  $L$  sobre um círculo de raio  $r$ , tal que  $\alpha = L/r$  radianos (rad). Por analogia, em um espaço tridimensional, um ângulo sólido ( $\Omega$ ) corresponde a uma superfície de área  $\sigma$  sobre uma esfera de raio  $r$ , tal que:

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (1.2)$$

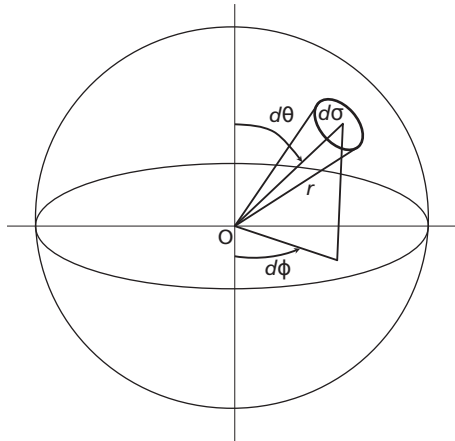
No caso do ângulo sólido, utiliza-se o esterradiano (sr) como unidade, embora tanto o ângulo plano quanto o sólido sejam grandezas adimensionais.

Considerando a esfera de raio  $r$  ilustrada na Fig. 1.2, centrada no ponto  $O$  e com um ponto arbitrário em sua superfície com coordenadas esféricas  $\theta$  e  $\phi$ , a área infinitesimal dessa superfície é dada por:

$$d\sigma = r \, d\theta \, r \, \sin\theta \, d\phi \quad (1.3)$$

Portanto, o ângulo sólido infinitesimal definido por essa área é:

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} = \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (1.4)$$



**Fig. 1.2** O ângulo sólido. Para um observador localizado em  $O$ , esse ângulo definiria o campo de visão de um objeto na superfície da esfera (p. ex., o Sol)

**Exercício 1.1:** Mostrar que o ângulo sólido definido por uma esfera vale  $4\pi$ .

### 1.3 Fluxo, intensidade, irradiância e radiância

De acordo com Paltridge e Platt (1976), a nomenclatura dos termos associados à radiação atmosférica resultou originalmente de distintas disciplinas. Dessa forma, alguns símbolos podem ter diferentes significados dependendo do autor. Neste livro emprega-se a nomenclatura recomendada pela CIE e adotada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1983). As principais grandezas utilizadas nos estudos envolvendo os processos radiativos na atmosfera são:

- *Energia radiante:* integral do fluxo radiante sob um dado intervalo de tempo  $\Delta t$ . Símbolos comumente utilizados:  $Q$ ,  $Q_e$ ,  $U$ . Unidade: J. Observação: os símbolos para a quantidade de energia radiante e suas respectivas taxas são também utilizados para a quantidade correspondente relativa à radiação visível, isto é, luminosidade e quantidade de fótons. Por essa razão, os subscritos  $e$ , para energético,  $v$ , para visível, e  $p$ , para fótons, podem ser adicionados quando houver possibilidade de confusão entre essas quantidades.

$$Q = \int_{\Delta t} \phi \, dt \quad (1.5)$$

- *Fluxo de radiação, fluxo radiativo ou potência radiante:* potência emitida, transferida ou recebida na forma de radiação. Símbolos:  $\phi$ ,  $\phi_e$ ,  $P$ . Unidade:  $\text{Js}^{-1} = \text{W}$ .

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.6)$$

- *Intensidade radiante (de uma fonte pontual em uma determinada direção):* quociente entre o fluxo de radiação (ou potência emitida) que deixa uma fonte para uma dada direção do espaço e o ângulo sólido infinitesimal de um cone representando tal direção. Símbolos:  $I$ ,  $I_e$ . Unidade:  $\text{Wsr}^{-1}$ .

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} = \frac{d^2Q}{dt \, d\Omega} \quad (1.7)$$

- *Irradiância (em um determinado ponto de uma superfície):* quociente entre o fluxo de radiação incidente sobre um elemento de superfície contendo

um ponto e a área do elemento de superfície. Símbolos:  $E, E_e$ .  
Unidade:  $\text{W m}^{-2}$ .

$$E = \frac{d\phi}{dA} = \frac{d^2Q}{dt dA} \quad (1.8)$$

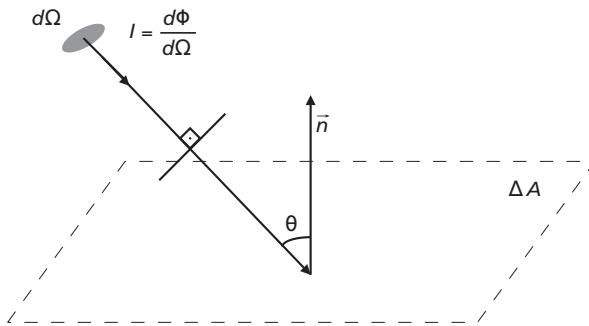
- **Radiância** (em uma dada direção, em um dado ponto de uma superfície real ou imaginária): é uma medida da quantidade de radiação recebida por um ponto ou emitida por uma fonte pontual em uma determinada direção. Isto é, o quociente entre a intensidade de radiação observada num certo elemento de superfície em uma dada direção e a área da projeção ortogonal desse elemento de superfície num plano perpendicular à direção tratada. Símbolos:  $L, L_e$ . Unidade:  $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ .

$$L = \frac{dI}{\cos\theta dA} = \frac{d^2\phi}{\cos\theta d\Omega dA} = \frac{d^3Q}{\cos\theta dt d\Omega dA} \quad (1.9)$$

Substituindo a primeira parte da Eq. 1.8, pode-se reescrever a Eq. 1.9 da seguinte forma:

$$L = \frac{dE}{\cos\theta d\Omega} \quad (1.10)$$

A Fig. 1.3 apresenta a configuração geométrica da definição de radiância.



**Fig. 1.3** Esquema geométrico da definição de radiância. O elemento de área a ser considerado é sempre perpendicular à direção de incidência

Da definição de radiância, pode-se estabelecer uma definição complementar para irradiância: ela é dada pela integral tomada sobre o hemisfério visível a partir de um dado ponto,  $L \cos\theta d\Omega$ , em que  $L$  é a radiância em um dado

ponto numa das várias direções dos feixes incidentes do ângulo sólido  $d\Omega$ , e  $\theta$ , o ângulo entre qualquer um desses feixes e a normal à superfície para esse dado ponto. Ou seja,

$$E = \int_{2\pi} L \cos \theta \, d\Omega \quad (1.11)$$

Conhecendo a radiância incidente em todas as direções (caracterizadas pelas coordenadas  $\theta$  e  $\phi$ ) em um determinado hemisfério, é possível determinar a irradiância total incidente em um hemisfério:

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) \cos \theta \, \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (1.12)$$

A Fig. 1.4 ilustra a complexidade envolvida no cálculo da Eq. 1.12. A Fig. 1.4A mostra feixes de radiâncias provenientes de diferentes pontos do hemisfério atingindo um alvo em superfície. Pela equação mencionada, a irradiância que atinge um determinado alvo pode ser calculada pelo somatório de todos os feixes de radiâncias que provêm de cada um dos pontos do hemisfério. Assim, os feixes compreendidos no hemisfério sobre o alvo podem ser matematicamente representados pelas radiâncias provenientes dos ângulos de 0 a  $\pi/2$ , na vertical (isto é,  $\theta$ , na Fig. 1.4B), e de 0 a  $2\pi$ , no plano horizontal (isto é,  $\phi$ , na Fig. 1.4B).

**Exercício 1.2:** Provar que, se a radiação é isotrópica, ou seja, a radiância é a mesma em todas as direções, a irradiância total incidente em um hemisfério é igual a  $\pi L$ .

## 1.4 Densidades espectrais

As grandezas definidas na seção anterior também podem ser especificadas em um intervalo infinitesimal de frequência ( $\nu$ ), de comprimento de onda ( $\lambda$ ) ou do número de ondas ( $\tilde{\nu}$ ) que cabe em 1 cm, uma definição tradicional da espectroscopia conhecida como número de onda. Nesse caso, as quantidades são denominadas *espectrais* e denotadas por um subscrito apropriado. Por exemplo, pode-se definir radiância espectral com relação ao comprimento de onda:

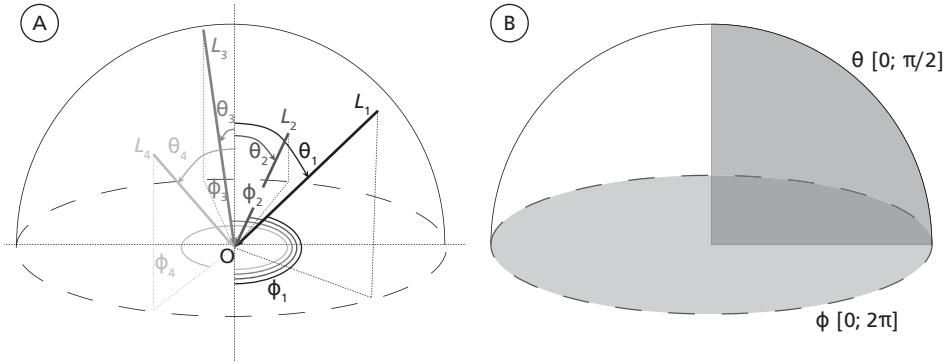
$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}] \quad (1.13)$$

ao número de onda:

$$L_{\tilde{\nu}} = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}] \quad (1.14)$$

ou à frequência:

$$L_{\nu} = \frac{dL}{d\nu} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}] \quad (1.15)$$



**Fig. 1.4** (A) Radiâncias provenientes de diversas direções atingindo o alvo (O) em superfície e (B) limites de integração para cálculos de irradiâncias com base nas radiâncias provenientes de todo o hemisfério superior, considerando uma superfície plana horizontal

As conversões entre  $L_{\lambda}$ ,  $L_{\nu}$  e  $L_{\tilde{\nu}}$  envolvem a velocidade da luz e suas relações. Da Eq. 1.1, tem-se que  $c = \lambda \nu$ , então:

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \Rightarrow \frac{d\tilde{\nu}}{d\nu} = \frac{1}{c} \quad (1.16A)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\tilde{\nu}}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda^2} \quad (1.16B)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\nu}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} \quad (1.16C)$$

Por exemplo, substituindo a Eq. 1.16B na Eq. 1.13, tem-se:

$$L_{\lambda} = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \left| \frac{d\tilde{\nu}}{d\lambda} \right| = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{dL}{d\tilde{\nu}} = \frac{1}{\lambda^2} L_{\tilde{\nu}} \quad (1.17)$$

De maneira análoga, podem-se obter as demais relações para as Eqs. 1.14 e 1.15, ou, ainda, relações semelhantes para irradiância, fluxo ou energia radiante.

Com base na grandeza espectral, valores integrados em determinados intervalos espectrais podem ser obtidos, visto que  $dL = L_\lambda d\lambda = L_\nu d\nu = L_{\tilde{\nu}} d\tilde{\nu}$  e, portanto:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(\lambda) d\lambda = \int_{\tilde{\nu}_1}^{\tilde{\nu}_2} L_{\tilde{\nu}}(\tilde{\nu}) d\tilde{\nu} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} L_\nu(\nu) d\nu$$

Quando a grandeza é expressa em termos de comprimento de onda, é comum denominá-la monocromática.

**Exercício 1.3:** Um instrumento é capaz de medir radiâncias espectrais de até  $10 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$ . A partir desse limite, há a queima do sensor. Verificar a possibilidade de utilizar esse sensor para medir a radiação emitida por uma fonte de radiâncias monocromáticas em  $500 \text{ nm}$  cujo valor máximo é  $2.000 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ .

## 1.5 Absortância, refletância e transmitância

A radiação eletromagnética interage com a matéria por espalhamento, por absorção ou por emissão. A atenuação (ou extinção, do inglês *extinction*) inclui os processos que diminuem a energia radiante, tais como a absorção e o espalhamento da radiação ao atravessar um meio qualquer. Já a emissão aumenta a intensidade radiante numa determinada orientação. O espalhamento proveniente de outras direções também pode adicionar fótons ao feixe incidente. No decorrer deste livro, tais processos serão abordados de maneira mais aprofundada.

No processo de absorção, parte ou toda a energia radiante é transferida para o meio no qual ela incide ou atravessa. Sendo assim, define-se *absortância* como a fração da radiação incidente que foi absorvida, ou, em outras palavras, como a razão entre a quantidade de energia absorvida e o total de energia que incide sobre um volume de matéria para um dado comprimento de onda. Em termos de fluxo radiativo, a absortância pode ser escrita como:

$$a_\lambda = \frac{\phi_{a\lambda}}{\phi_{i\lambda}} \quad (1.18)$$

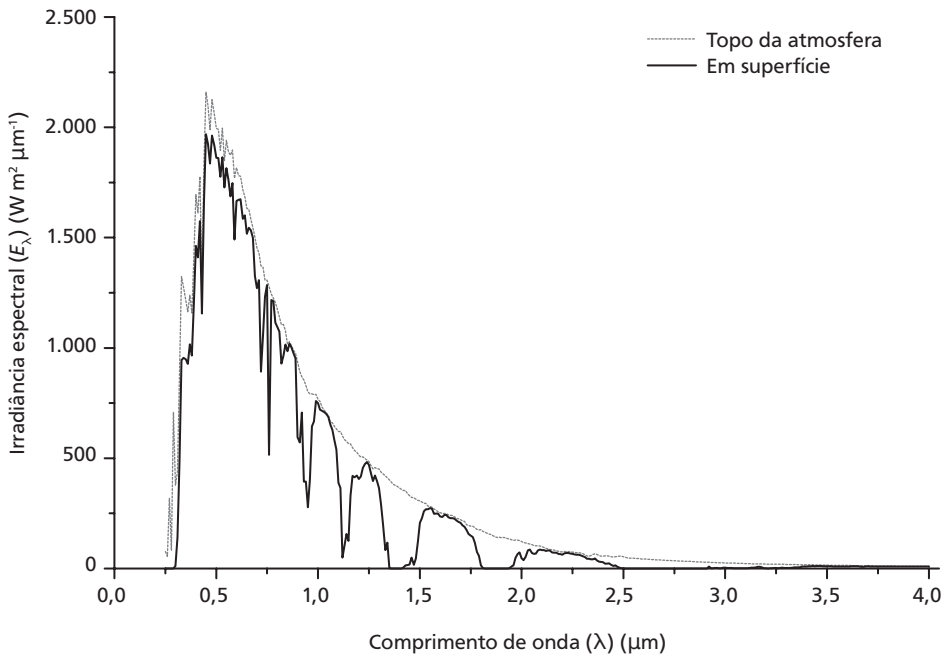
em que  $a_\lambda$  é a absortância,  $\phi_{a\lambda}$ , o fluxo de radiação espectral absorvido pelo meio, e  $\phi_{i\lambda}$ , o fluxo incidente. A mesma relação, assim como as seguintes



nesta seção, pode ser escrita para radiâncias ou irradiâncias no lugar do fluxo de radiação.

O processo de absorção sempre está associado a uma alteração física do meio atravessado. No caso da atmosfera, a alteração mais significativa é o aumento da temperatura ou energia interna. A Fig. 1.5 mostra a atenuação sofrida pela radiação solar espectral incidente no topo da atmosfera (linha cinza) ao chegar à superfície (linha preta) ao meio-dia de um dia típico de verão, de céu claro e sem nuvens, na cidade de São Paulo.

Podem-se observar nessa figura regiões de forte absorção por gases presentes na atmosfera, tais como o vapor d'água, o metano e o gás carbônico, na região infravermelha (comprimentos de onda superiores a  $0,8\ \mu\text{m}$ ), e o ozônio, na região ultravioleta (entre  $0,2\ \mu\text{m}$  e  $0,3\ \mu\text{m}$ ). Nessas regiões espectrais, para as condições da simulação, o processo de absorção predomina sobre o de espalhamento.



**Fig. 1.5** *Irradiância solar espectral incidente no topo da atmosfera (linha cinza) e em superfície (linha preta). Simulação numérica com o código de transferência radiativa SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) – um modelo ou código computacional que permite estudar os processos radiativos na atmosfera (Ricchiazzi et al., 1998) – para um dia típico de verão, sem nuvens, ao meio-dia, na cidade de São Paulo ( $23,5^\circ\text{S}$ ;  $46,5^\circ\text{W}$ )*

No processo de espalhamento, a radiação é apenas desviada da orientação original, podendo ser refletida ou transmitida. Se a radiação, quando espalhada, voltar para o hemisfério de origem, é denominada refletida; caso contrário, diz-se que ela foi transmitida. Em estudos atmosféricos, o hemisfério é definido a partir de um plano horizontal de referência. Quando a radiação monocromática não sofre atenuação ao atravessar um meio, diz-se que foi diretamente transmitida (componente  $t_d$  na Fig. 1.6); caso contrário, a transmissão é chamada difusa ( $t_d$ ). Denomina-se *refletância* ( $\rho_\lambda$ ) a razão entre as radiações refletida e incidente e *transmitância* ( $t_\lambda$ ) a razão entre a radiação transmitida, isto é, a soma dos componentes direto e difuso, e a radiação incidente. De maneira análoga à Eq. 1.18, podem-se escrever:

$$\rho_\lambda = \frac{\phi_{r_\lambda}}{\phi_{i_\lambda}} \quad (1.19)$$

$$t_\lambda = \frac{\phi_{t_\lambda}}{\phi_{i_\lambda}} \quad (1.20)$$

em que os subscritos  $r$  e  $t$  indicam os fluxos espectrais de radiação refletido e transmitido pelo meio.

É importante notar que a reflexão, a transmissão e, como já observado na Fig. 1.5, a absorção dependem do comprimento de onda da radiação incidente. Ou seja, os fenômenos ocorrem de maneira distinta em cada linha do espectro eletromagnético. Por esse motivo, a representação nas equações tem como destaque o subscrito  $\lambda$ . Porém, é importante atentar se os fenômenos estão sendo considerados de maneira espectral, isto é, para uma linha, um intervalo, ou para todo o espectro integrado.

A Fig. 1.6 ilustra um feixe de irradiância espectral incidindo sobre um volume de matéria. Parte da radiação é refletida, parte absorvida e outras transmitidas, de maneira direta ou difusa.

Dessa figura, têm-se:

$$\rho_{1\lambda} E_\lambda + \rho_{2\lambda} E_\lambda = \rho_\lambda E_\lambda \quad (1.21)$$

$$t_{d1\lambda} E_\lambda + t_{d2\lambda} E_\lambda = t_{d\lambda} E_\lambda \quad (1.22)$$

$$t_{d\lambda} E_\lambda + t_{d\lambda} E_\lambda = t_\lambda E_\lambda \quad (1.23)$$

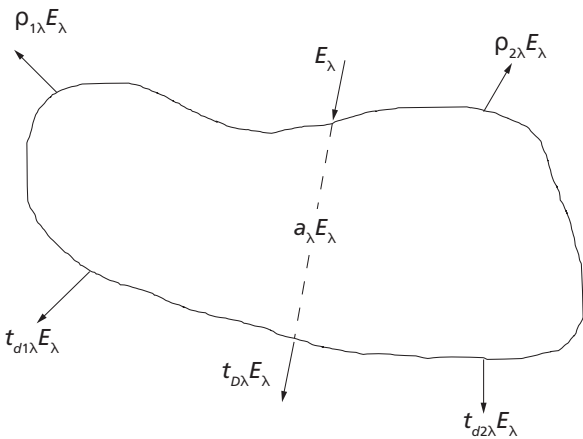
Por conservação de energia no meio, pode-se escrever:

$$a_{\lambda}E_{\lambda} + \rho_{\lambda}E_{\lambda} + t_{\lambda}E_{\lambda} = E_{\lambda}$$

ou ainda

$$a_{\lambda} + \rho_{\lambda} + t_{\lambda} = 1 \tag{1.24}$$

A título de ilustração, a Tab. 1.1 apresenta valores médios típicos de refletância da superfície para ondas curtas, isto é, radiação de comprimentos de onda inferiores a 4,0  $\mu\text{m}$ .



**Fig. 1.6** Esquema dos componentes absorvido, refletido e transmitido da radiação incidente com relação a um plano horizontal de referência. Os subscritos 1 e 2 apenas indicam direções arbitrárias dos feixes refletidos ou transmitidos de modo difuso. Outras direções ( $i = 3, 4, 5, \dots, n$ ) foram evitadas para não poluir a figura

**Tab. 1.1** Valores médios da refletância de diferentes superfícies na região espectral de ondas curtas ( $\lambda \leq 4,0 \mu\text{m}$ ), em porcentagem

| Superfícies aquáticas  |    | Cobertura de nuvens |       |
|------------------------|----|---------------------|-------|
| Latitude 0° (inverno)  | 6  | Cumuliforme         | 70-90 |
| Latitude 30° (inverno) | 9  | Stratus (espessas)  | 59-84 |
| Latitude 60° (inverno) | 21 | Altostratus         | 39-59 |
| Latitude 0° (verão)    | 6  | Cirrostratus        | 44-50 |
| Latitude 30° (verão)   | 6  |                     |       |
| Latitude 60° (verão)   | 7  |                     |       |

**Tab. 1.1**    Valores médios da refletância de diferentes superfícies na região espectral de ondas curtas ( $\lambda \leq 4,0 \mu\text{m}$ ), em porcentagem (continuação)

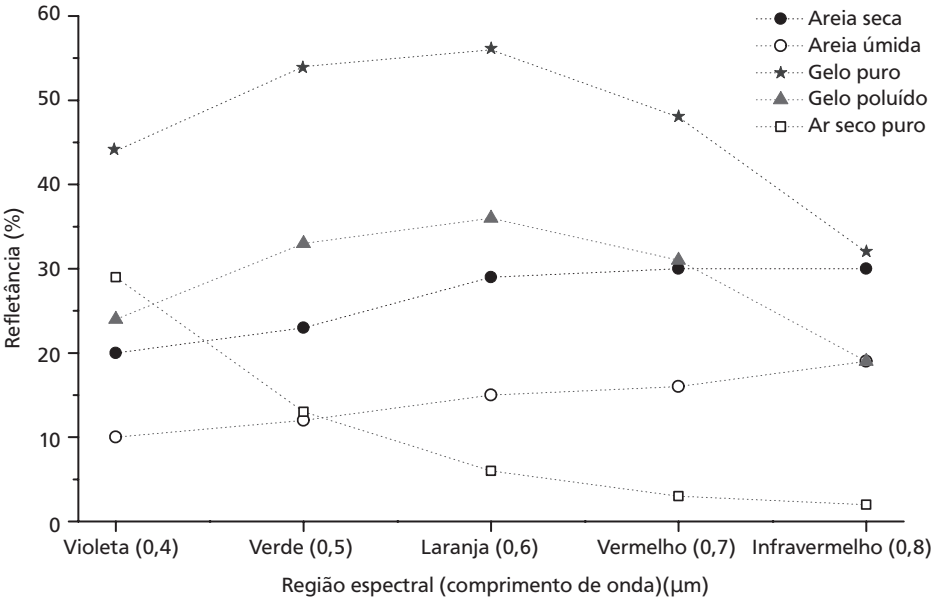
| Solos               |       | Corpos celestes |       |
|---------------------|-------|-----------------|-------|
| Neve fresca         | 75-95 | Terra           | 34-42 |
| Neve envelhecida    | 40-70 | Lua             | 6-7   |
| Gelo no mar         | 30-40 | Júpiter         | 73    |
| Duna de areia seca  | 35-45 | Marte           | 16    |
| Duna de areia úmida | 20-30 | Mercúrio        | 5-6   |
| Solo escuro         | 5-15  | Netuno          | 84    |
| Solo úmido cinza    | 10-20 | Plutão          | 14    |
| Argila seca         | 20-35 | Saturno         | 76    |
| Concreto seco       | 17-27 | Urano           | 93    |
| Asfalto (piche)     | 5-10  | Vênus           | 76    |

| Superfícies naturais   |       | Pele humana |       |
|------------------------|-------|-------------|-------|
| Deserto                | 25-30 | Branca      | 43-45 |
| Savana (estação seca)  | 25-30 | Morena      | 35    |
| Savana (estação úmida) | 15-20 | Negra       | 16-22 |
| Chapada                | 15-20 |             |       |
| Matagal                | 15-20 |             |       |
| Pradaria               | 10-20 |             |       |
| Floresta caducifólia   | 10-20 |             |       |
| Tundra                 | 15-20 |             |       |
| Culturas               | 15-25 |             |       |

Fonte: adaptado de Sellers (1965).

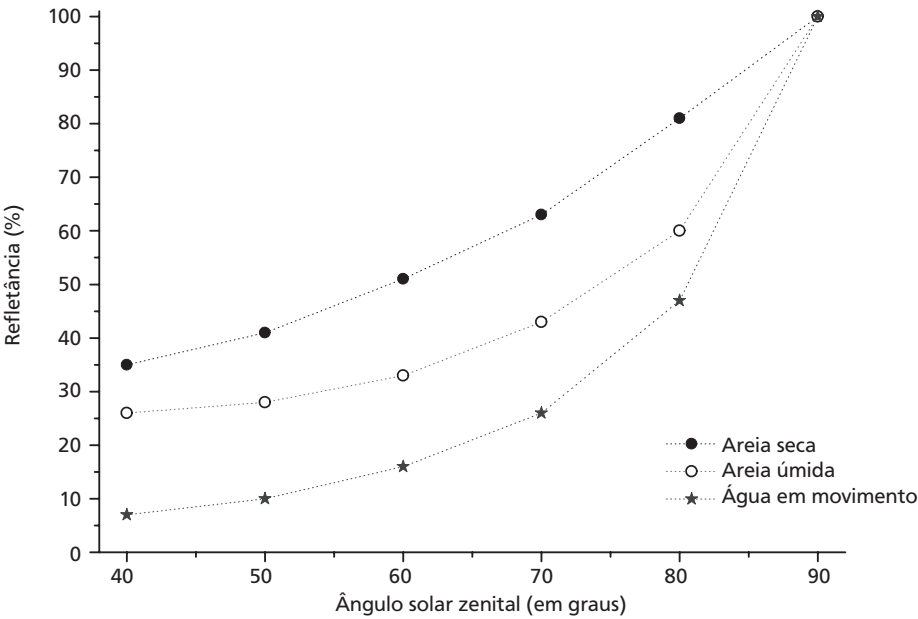
As Figs. 1.7 e 1.8 resumem tais variações para alguns tipos de superfície. É importante notar que a refletância varia não só em função do tipo de superfície e do comprimento de onda, mas também de acordo com a posição do disco solar.

E, para representar a transmitância da atmosfera terrestre, a Fig. 1.9 apresenta as transmitâncias espectrais das diferentes bandas de absorção presentes na atmosfera terrestre levando-se em conta a simulação utilizada na Fig. 1.5.



**Fig. 1.7** Refletância espectral da superfície com o Sol a pino em função do comprimento de onda

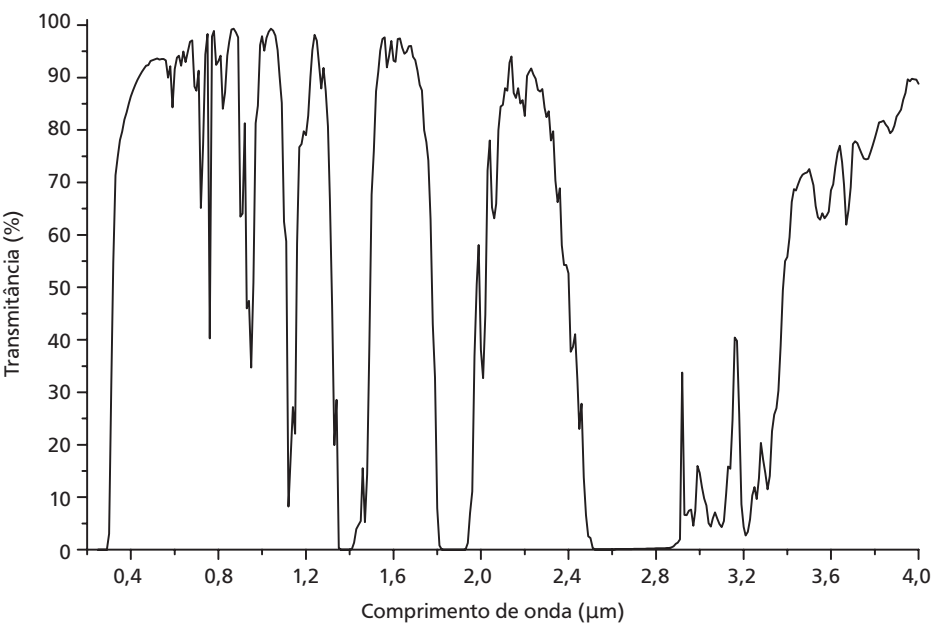
Fonte: adaptado de Sellers (1965).



**Fig. 1.8** Refletância média no espectro solar ( $\lambda < 4 \mu\text{m}$ ) da superfície em função do ângulo solar zenital

Fonte: adaptado de Sellers (1965).

Alguns pontos interessantes devem ser destacados da Fig. 1.9. Na região visível (entre, aproximadamente,  $0,4\ \mu\text{m}$  e  $0,8\ \mu\text{m}$ ), a transmitância da atmosfera é muito alta. Isto é, essa região, conhecida como *janela atmosférica*, é praticamente transparente devido à baixa absorção de radiação pelos componentes atmosféricos. Por outro lado, em outros diversos pontos da região espectral analisada, observa-se a atmosfera totalmente opaca à radiação, pois a transmitância é nula. Essas regiões, principalmente observadas no início do ultravioleta e em muitos intervalos da região infravermelha, são responsáveis pelo aumento de temperatura na estratosfera e na troposfera terrestres, respectivamente. No decorrer deste livro, esses assuntos serão retomados.



**Fig. 1.9** Transmitância espectral global da atmosfera terrestre para incidência vertical em um dia de verão na cidade de São Paulo com base na simulação com o modelo SBDART

Viu-se que um volume de matéria é dito opaco quando sua transmitância for desprezível ou nula. Nesse caso, a soma da absorptância com a refletância é unitária. Além disso, deve-se sempre destacar que as grandezas apresentadas nesta seção se referem a grandezas espectrais, o que significa que podem variar conforme o comprimento de onda da radiação incidente. Vale lembrar também que dependem dos constituintes do meio ou corpo atravessado. No

caso da atmosfera, os constituintes são os gases, as partículas de aerossol e as nuvens, e, como será visto no Cap. 5, tais grandezas variam de acordo com a composição química desses constituintes. No próximo capítulo será estudado um meio especial no qual toda a radiação incidente é absorvida, de modo que a absorptância é unitária em todos os comprimentos de onda. Esse tipo de meio é fundamental nas considerações feitas para o desenvolvimento dos modelos de transferência radiativa.