

Radiação Solar

Objetivos:

1. Compreender a origem e os efeitos da radiação solar;
2. Identificar e descrever as diferentes bandas do espectro eletromagnético;
3. Quantificar a radiação solar no topo da atmosfera;
4. Estudar os processos de atenuação da radiação solar na atmosfera;
5. Quantificar a radiação solar na superfície do solo;
6. Estudar as causas de variação da radiação solar;
7. Conhecer alguns instrumentos de medição da radiação solar.

Desenvolvimento:

1. Generalidades
 2. O Espectro Eletromagnético
 3. Radiação por Unidade de Área e Tempo
 4. Leis da Radiação
 5. Radiação Solar Extraterrestre
 6. Efeitos da Atmosfera sobre a Radiação Solar
 7. Radiação Solar Direta, Difusa e Global
 8. Radiação Solar em Dias Claros
 9. Radiação Refletida
 10. Instrumentos e Medição da Radiação Solar
 11. Conclusões
 12. Exercícios Propostos
 13. Bibliografia Citada e Recomendada
-

1. Generalidades

- Energia solar e radiação solar – ondas eletromagnéticas (OEM)
- Distribuição da radiação solar na superfície da terrestre
- Importância da energia solar – litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera
- Importância agrônômica da radiação solar

2. O Espectro Eletromagnético

- O que é?
- Comprimento de onda (λ), frequência (f) e velocidade de propagação (V)

$$V = \lambda \cdot f \tag{1}$$

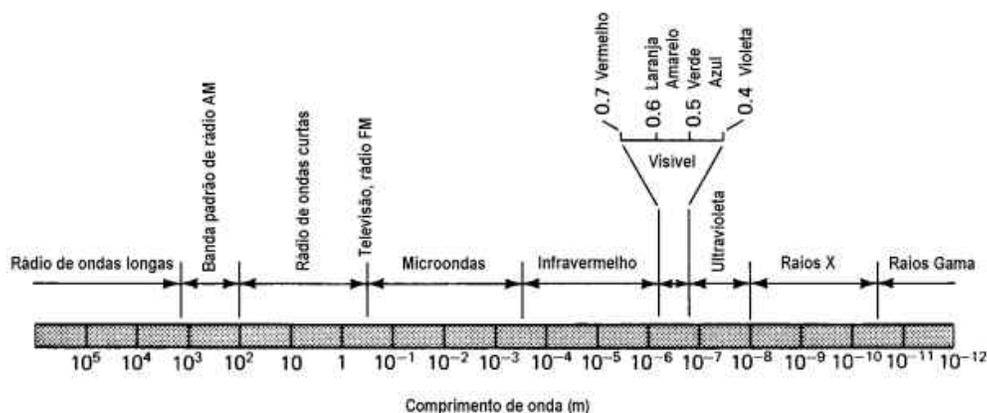


Figura 1. Espectro eletromagnético das radiações conhecidas, organizadas de acordo com o comprimento de onda.

- Espectro eletromagnético da radiação solar

Tabela 1. Principais bandas do espectro eletromagnético da radiação solar. (Fonte HEUVELDOP et al., 1986).

λ (nm)	200-390	390-450	450-490	490-580	580-600	600-620	620-760	> 760
Cor do espectro	UV	violeta	azul	verde	amarelo	laranja	vermelho	IV
Efeitos da radiação		<i>Absorção pelas plantas</i>		<i>Reflexão e transmissão pelas plantas</i>			<i>Absorção pelas plantas</i>	

Luz percebida pelo olho humano

- Radiação de onda curta e radiação de onda longa

3. Radiação por Unidade de Área e de Tempo

- Densidade de fluxo de radiação? Unidade no SI é $W\ m^{-2}$, sendo que $1\ W = 1\ J\ s^{-1}$. É também comum a unidade de $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$.
- Emitância → radiação emitida (Sol, $6 \cdot 10^7\ W\ m^{-2}$)
- Irradiância → radiação incidente sobre uma superfície.

4. Leis da Radiação

- Definições básicas: corpo negro, emissividade (ϵ_λ), absorvidade (a_λ), refletividade (r_λ) e transmissividade (τ_λ).

$$a_\lambda + r_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2)$$

- Algumas leis da radiação:

Lei de Stefan-Boltzmann $E_{cn} = \sigma \cdot T^4$ (3)

onde σ = constante de proporcionalidade, denominada constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é $5,6697 \cdot 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4} = 4,03 \cdot 10^{-9}\ MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}\ K^{-4}$ e T = temperatura absoluta (K).

Lei de Kirchoff $E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ (5)

onde todos os componentes já foram definidos anteriormente.

Valores de emissividade para algumas superfícies naturais: neve 0,99 (fresca) e 0,82 (velha); gramínea 0,90 (1 m altura) e 0,95 (0,02 m altura); culturas agrícolas 0,94-0,99 (anuais); água 0,92-0,97 (Sol baixo e alto); floresta decídua 0,96; floresta coníferas 0,98-0,99; solo argiloso 0,97 (úmido) e 0,95 (seco).

Exercício Prático 1) *Considere a sua temperatura corporal em torno de 37°C. Assumindo uma emissividade hipotética de 0,8, determine a emitância do seu corpo.*

Lei de Wien $\lambda^* = \frac{2897,8}{T}$ (4)

Exemplo Prático 2) *Determine com base na equação 4, o comprimento de onda de máxima emitância espectral para o Sol ($T = 5770\ K$) e para a Terra ($T = 300\ K$) na temperatura de corpo negro.*

Lei de Lambert $I = I_N \cdot \cos \hat{z}$ (6)

onde \hat{z} = ângulo normal com a superfície, I = irradiância sobre a superfície e I_N = irradiância normal à superfície.

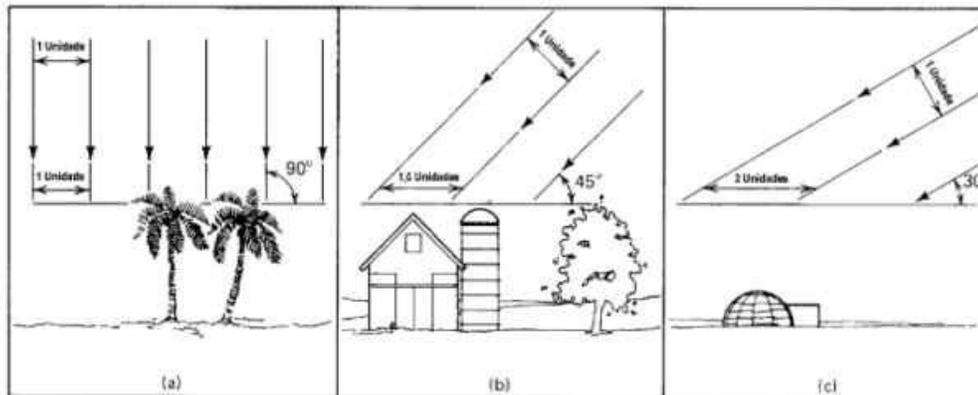


Figura 2. Esquema para compreensão da Lei de Lambert.

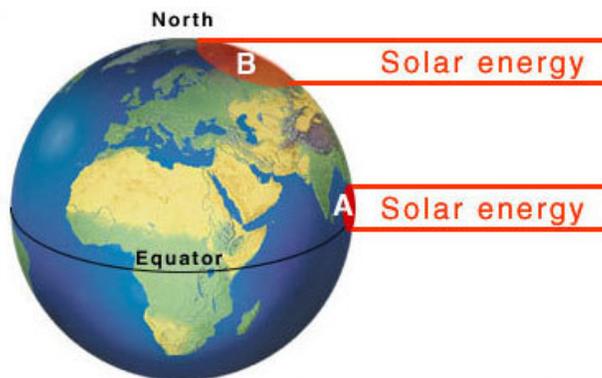


Figura 3. A irradiância (radiação recebida) nas latitudes maiores é menor em função ao ângulo de incidência com a normal à superfície (Lei de Lambert).

Exercício Prático 3) *Represente esquematicamente Lei de Lambert e derive a equação 6.*

5. Radiação Solar Extraterrestre

Constante solar (S_c) $\rightarrow 0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1} \cong 1367 \text{ W m}^{-1}$

A irradiância instantânea no topo da atmosfera (R_{oi})

$$R_{oi} = S_c \cdot D_r \cdot \cos \hat{z} \quad (7)$$

A irradiância diária no topo da atmosfera (R_o)

$$R_o = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot S_c \cdot D_r \cdot (\hat{H} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \hat{H}) \quad (8)$$

onde R_o ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), S_c ($\text{MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), D_r (adimensional), \hat{H} (rad), ϕ (rad) e δ (rad).

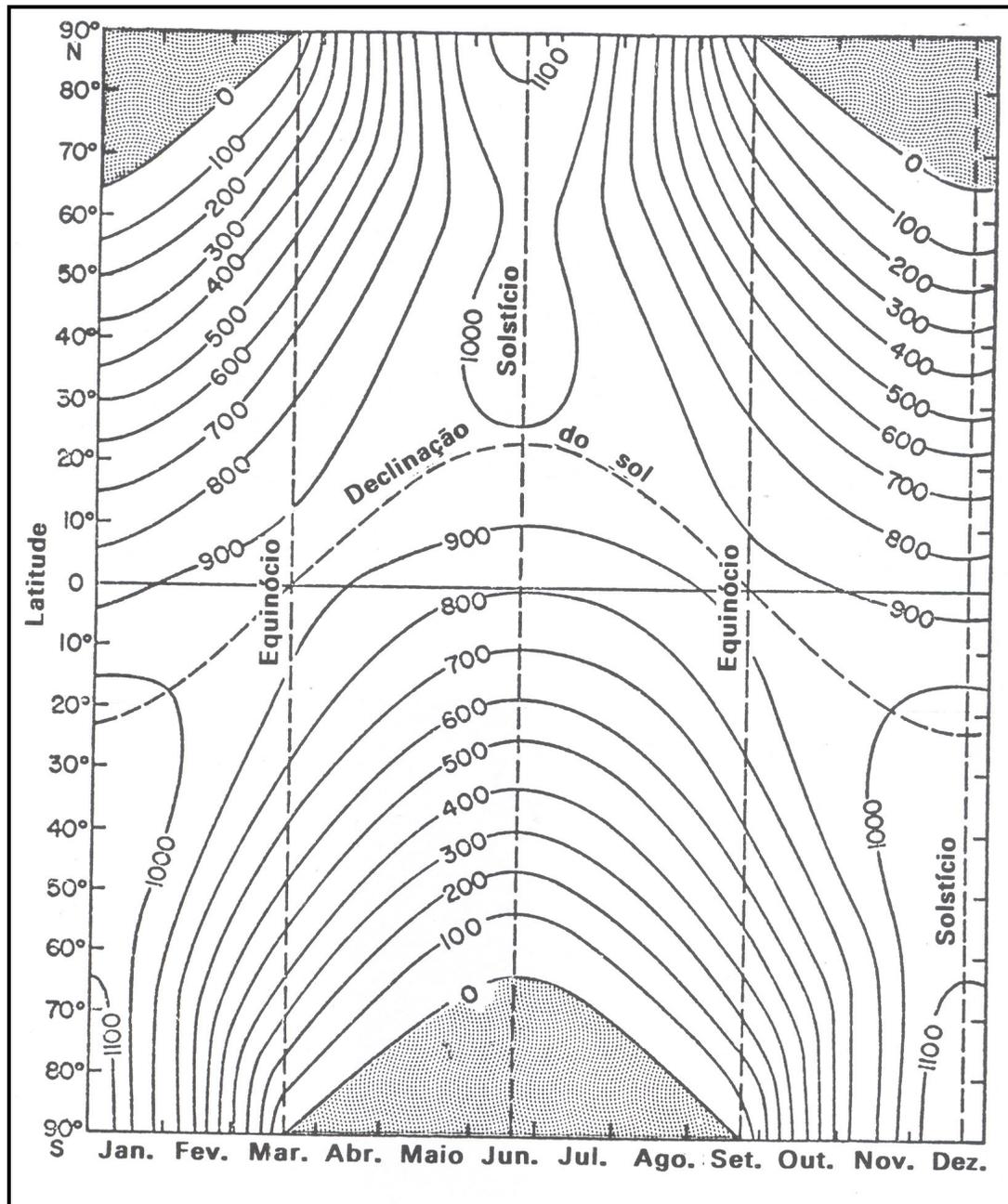


Figura 4. Variação anual da irradiância solar (Ly dia^{-1}) sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera, em função da latitude e época do ano. (Fonte VIANELLO e ALVES, 1991).

Exemplo Prático 4) *Determine a irradiância solar no topo da atmosfera nas coordenadas de Cruz das Almas ($12^{\circ}40'39''\text{ S}$; $39^{\circ}06'23''\text{ W}$; 225 m), no dia 13 de junho.*

A Tabela 2 a seguir apresenta os fatores de conversão de unidades de radiação.

Tabela 2. Fatores de conversão para radiação solar (Fonte ALLEN et al., 1998).

Unidades	Fator multiplicativo para obter energia recebida sobre uma superfície unitária por unidade de tempo				Equivalente de lâmina d'água evaporada
	MJ m ⁻² dia ⁻¹	J cm ⁻² dia ⁻¹	cal cm ⁻² dia ⁻¹	W m ⁻²	mm dia ⁻¹
1 MJ m ⁻² dia ⁻¹	1	100	23,9	11,6	0,408
1 cal cm ⁻² dia ⁻¹	4,1868·10 ⁻²	4,1868	1	0,485	0,0171
1 W m ⁻²	0,0864	8,64	2,06	1	0,035
1 mm dia ⁻¹	2,45	245	58,5	28,4	1

Exemplo Prático 5) Converter 15,5 MJ m⁻² dia⁻¹ em mm dia⁻¹ e cal cm⁻² dia⁻¹.

6. Efeitos da Atmosfera sobre a Radiação Solar

- Nem toda a radiação solar incidente no limite superior da atmosfera chega à superfície terrestre.
- Fenômenos de atenuação: absorção, reflexão, dispersão ou espalhamento e transmissão
- Contribuição dos principais constituintes da atmosfera (Figura 5)

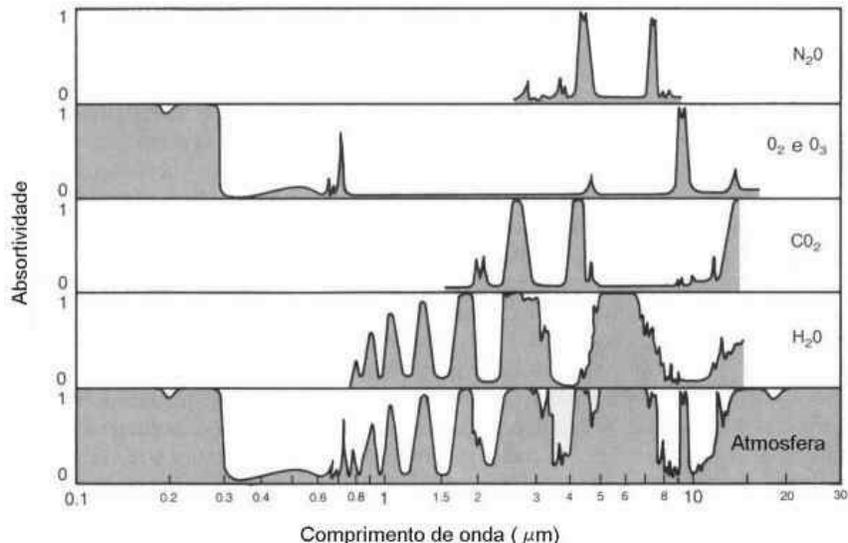


Figura 5. Espectros de absorção para a atmosfera e alguns constituintes isolados (óxido nitroso N₂O, oxigênio O₂, ozônio O₃, gás carbônico C₂O e vapor d'água H₂O).

7. Radiação Solar Direta, Difusa e Global

Radiação solar direta (R_d)

Radiação solar difusa ou do céu (R_c)

Radiação solar global (R_g) $R_g = R_d + R_c$ (9)

$$R_g = R_o \cdot \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (10)$$

onde R_g = radiação solar (ondas curtas) que atinge a superfície do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); n = duração real do brilho solar (h) – valor fornecido pelo heliógrafo; N = duração máxima do brilho solar (h); n/N = razão de insolação (adimensional); R_o = radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); a e b = constantes.

- Significado físico das constantes a e b

Exemplo Prático 6) *Determine R_g para Cruz das Almas, no dia 13 de junho, assumindo $a = 0,25$ e $b = 0,29 \cos\phi$. Considere também $a = 0,25$ e $b = 0,50$. Compare os resultados.*

8. Radiação Solar em Dias Claros

Radiação solar em dias claros (R_{go})

a) localidades ao nível do mar ou quando valores locais de a e b estão disponíveis:

$$R_{go} = (a + b) \cdot R_o \quad (11)$$

b) localidades cujos valores de a e b não estão disponíveis:

$$R_{go} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot A) \cdot R_o \quad (12)$$

onde A = altitude do local (m).

Exemplo Prático 7) *A altitude de Cruz das Almas é em torno de 225 m. Determine para esta localidade a R_{go} no dia 13 de junho, pelos dois métodos acima.*

9. Radiação Refletida

Radiação refletida (R_r)

$$R_r = \alpha \cdot R_g \quad (13)$$

onde α = albedo (< 1) e R_g = radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Alguns valores de albedo: água 3 a 10% (Sol alto) e 10 a 100% (Sol baixo); florestas 12 a 18%; culturas agrícolas 15 a 26%; gramíneas 16% (1 m de altura) e 26% (0,02 m de altura); asfalto 9%; aço 80%; florestas 12% a 18%; culturas agrícolas 15% a 26%; neve fresca 95%.

Exemplo Prático 8) *Determine a R_r em Cruz das Almas, no dia 13 de junho, considerando uma área coberta com grama e em pleno desenvolvimento vegetativo.*

10. Instrumentos e Medição da Radiação Solar

Piranômetro → medir a radiação solar global. Ex. piranômetro Eppley. O piranômetro mais difundido no Brasil é o actinógrafo bimetalico, do tipo Robitzsch, totalmente mecânico.

Heliógrafo → obtenção da duração real do brilho solar. Ex. heliógrafo Campbell-Stokes

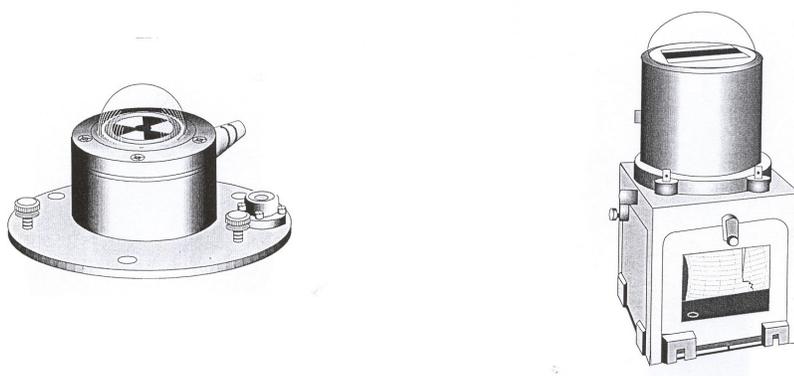


Figura 6. Piranômetro Eppley (esquerda) e actinógrafo bimetalico de Robitzsch (direita).

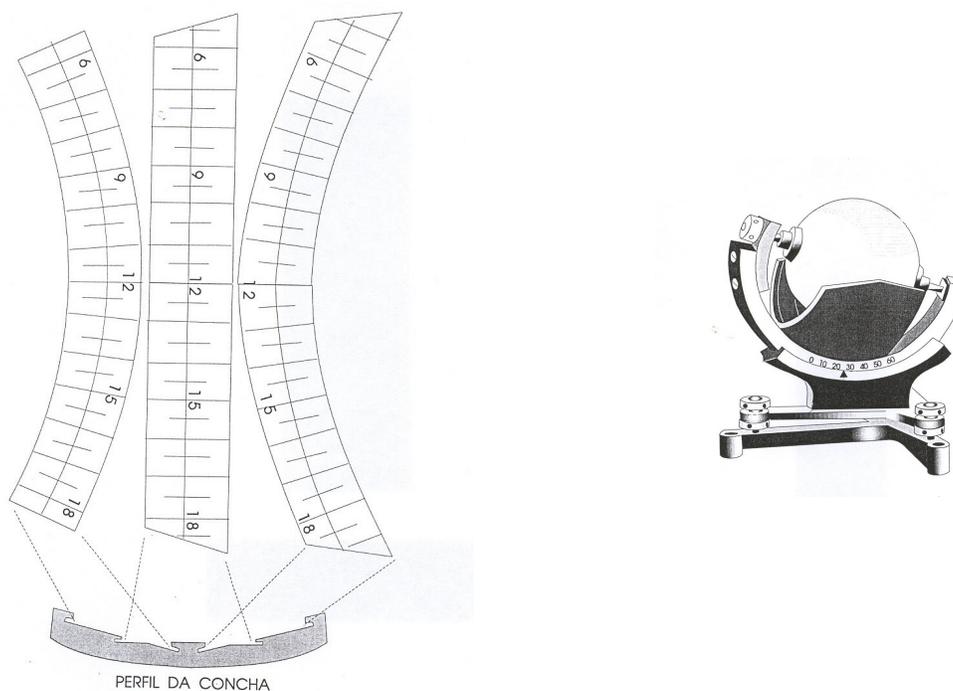


Figura 7. Heliogramas (esquerda) e heliógrafo (direita). (Fonte VAREJÃO-SILVA, 2001)

Albedômetro → obtenção do albedo

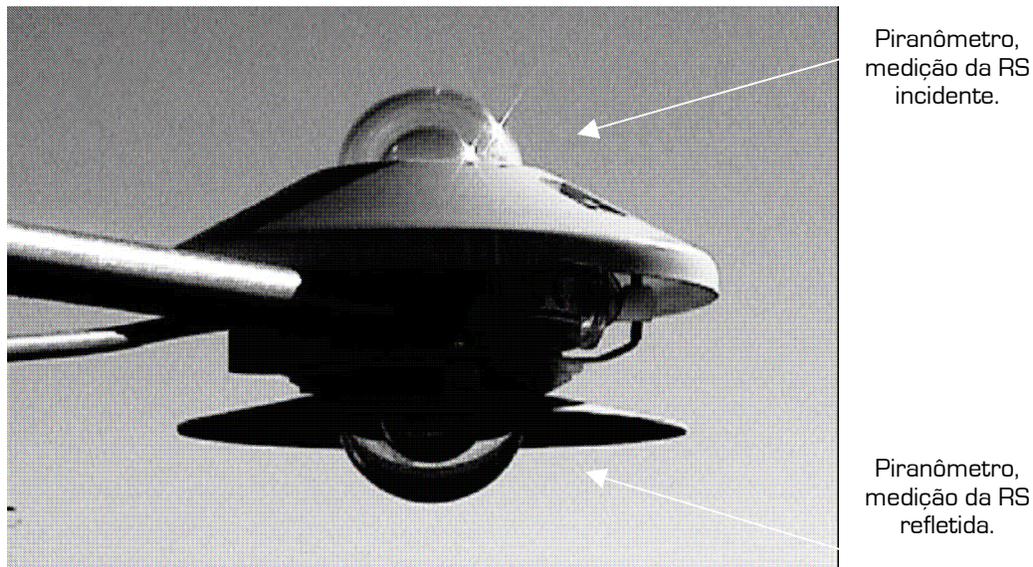


Figura 8. Albedômetro (modelo CM-15 Kipp and Zonen)

13. Conclusões

Estudos sobre a radiação solar são indispensáveis para o seu melhor aproveitamento como recurso energético natural renovável. É uma fonte de energia alternativa que precisa melhor ser entendida para o devido emprego, especialmente em regiões aonde fontes convencionais ainda não chegaram. Trata-se inclusive de uma fonte energética não poluidora.

14. Exercícios Propostos

- EP.01. Determine a emitância de um corpo não-negro (cinzento) a temperatura de 27°C, cuja emissividade é 0,88. Considere $\sigma = 4,03 \cdot 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} \text{ K}^{-4}$.
- EP.02. Considere a localidade de Santa Luz, Bahia (11°16' S, 39°21' W, 349 m). Determine o dia do ano em que o Sol culmina zenitalmente. Para este dia, determine a irradiância solar no topo da atmosfera. Expresse o resultado em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, W m^{-2} e mm dia^{-1} .
- EP.03. Considere para a localidade de Santa Luz (coordenadas acima) $n = 10 \text{ h}$ (valor médio de insolação do mês de janeiro). Determine a radiação solar global no 15º dia do mês. Assumir $a = 0,25$ e $b = 0,29 \cdot \cos\phi$.
- EP.04. Calcule o fluxo de radiação de onda longa emitida pela Terra (R_{Terra}), assumindo $T = 300 \text{ K}$ e $\varepsilon = 0,95$. Estime, adicionalmente, o comprimento de onda ao qual corresponde a máxima emitância.

15. Bibliografia Citada e Recomendada

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy. 1998. 300 p.

HEUVELDOP, J.; J. P. TASIÉS; S. Q. CONEJO; L. E. PRIETO. *Agroclimatología tropical*. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia. 1986. 394 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e climatologia*. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia-Ministério da Agricultura. 2001. 515 p.

VINAELLO, R. L.; ALVES, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa: UFV – Imprensa Universitária. 1991. 449 p.