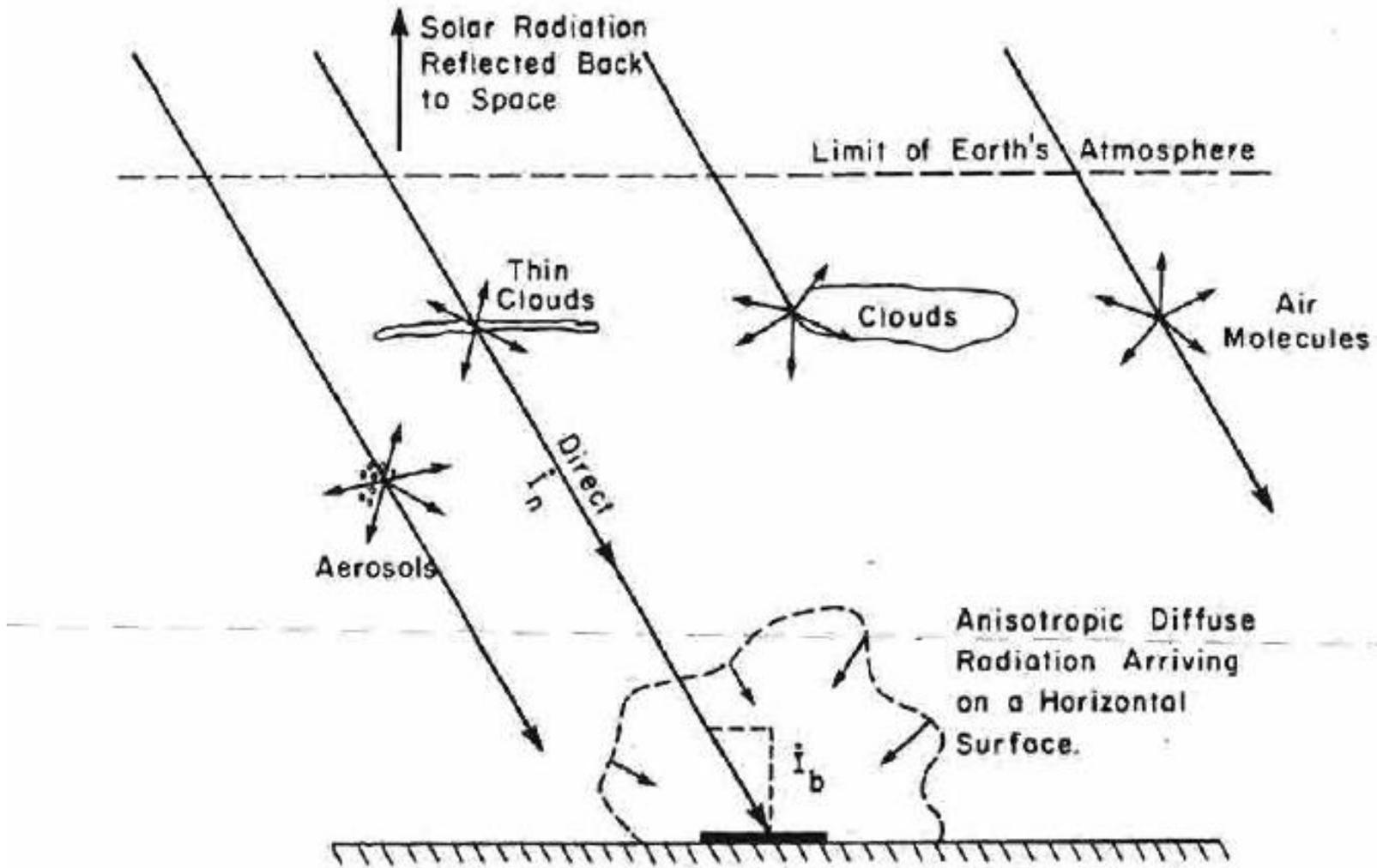


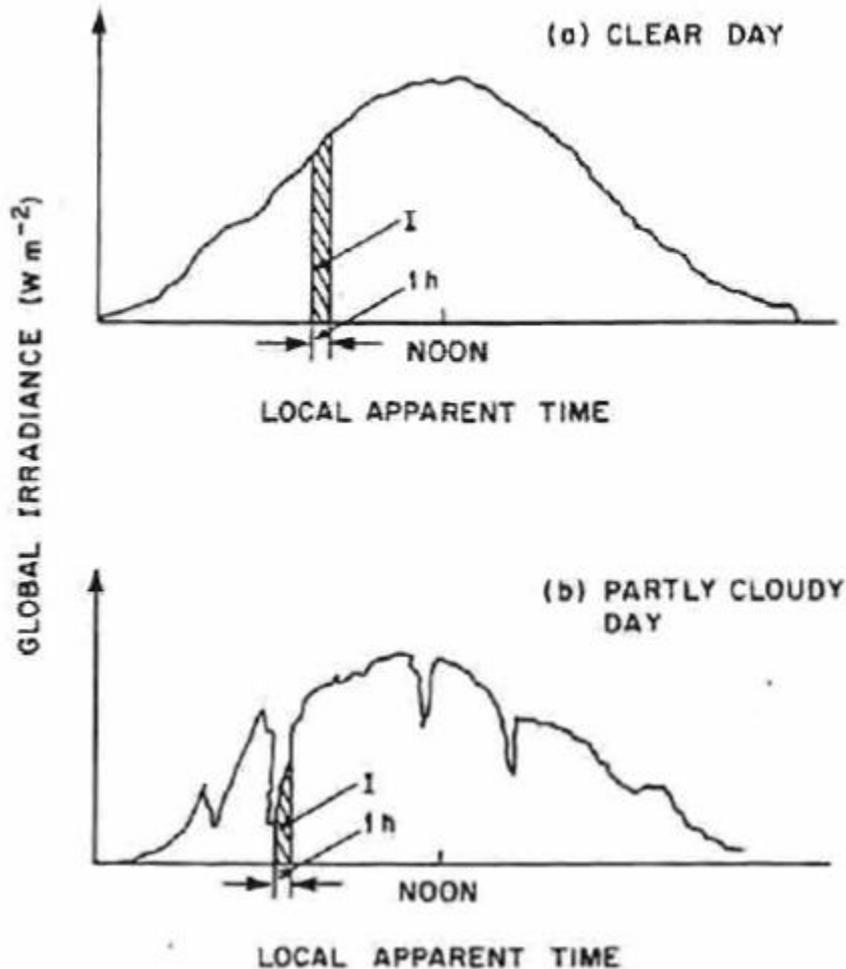
RADIAÇÃO E ENERGIA SOLAR

Miguel Centeno Brito

Radiação global na horizontal



Radiação global na horizontal



Medida de radiação directa,
normal aos raios solares

$$I_b = I_n \cos \theta_z$$

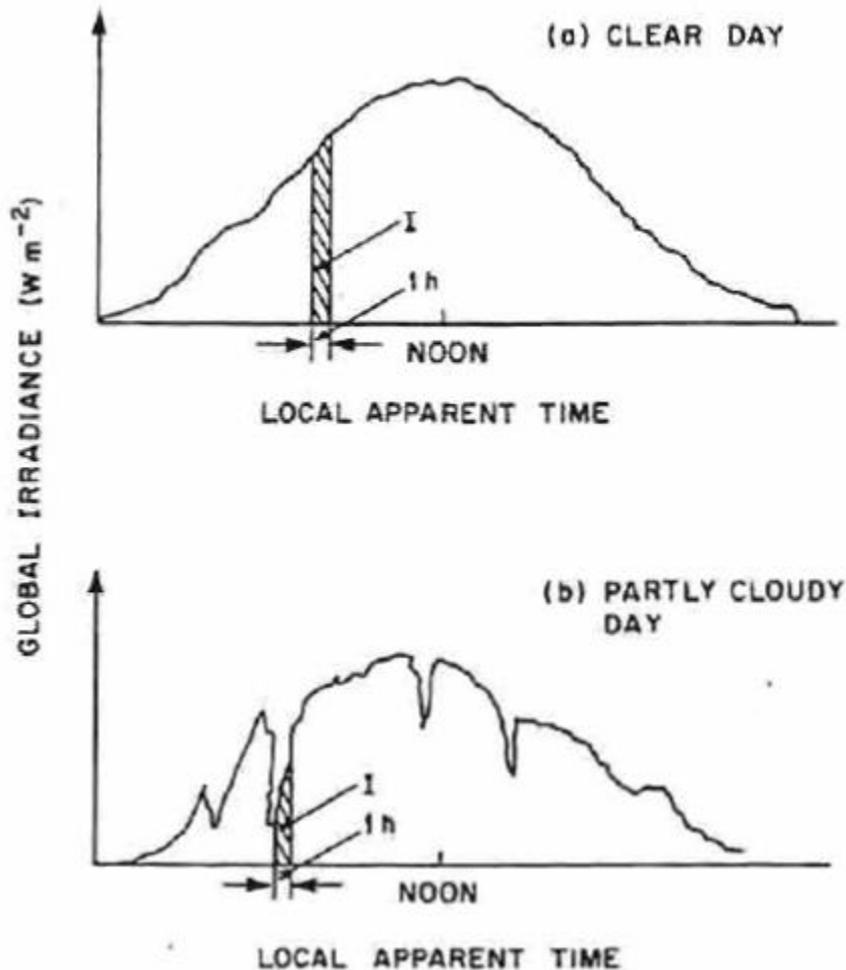
Ao longo de uma hora temos
portanto

$$I_b = \int^{1 \text{ h}} I_n \cos \theta_z dt$$

A radiação difusa pode ser
medida directamente ou então
calculada a partir da radiação
global

$$I_d = I - I_b$$

Radiação global na horizontal



Ao longo de um dia temos

$$H = \int^{\text{day}} \dot{I} dt$$

e

$$H_d = \int^{\text{day}} \dot{I}_d dt$$

Podemos ainda calcular valores médios diários para n_d dias em n_y anos fazendo

$$\bar{I} = \left(\sum_1^{n_y} \sum_1^{n_d} I \right) / n_y n_d$$

$$\bar{H} = \sum^{\text{day}} \bar{I}$$

Radiação global na horizontal

Ao contrário da radiação solar extraterrestre, a radiação solar na superfície, depois de atravessar a atmosfera, **não pode ser calculada** rigorosamente.

No entanto é **essencial** sabê-la estimar para podermos dimensionar sistemas solares, desenhar edifícios, compreender o crescimentos das plantas, etc.

Podemos **medir** as diferentes componentes da radiação solar (direta, difusa, global) ou estima-la a partir de **medidas indiretas**.

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE IQBAL

$$\dot{I}_n = 0.9751 E_0 I_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

Porque só estamos a considerar uma gama espectral entre 0.3 – 3.0 μm

E_0 é a excentricidade da orbita terrestre

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE IQBAL

$$\dot{I}_n = 0.9751 E_o \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

$$\tau_r = e^{-0.0903 m_a^{0.84} (1 + m_a - m_a^{1.01})} \quad \text{Rayleigh} \quad \text{Ozono}$$

$$\tau_o = 1 - \left[0.1611 U_3 (1 + 139.48 U_3)^{-0.3035} - 0.002715 U_3 (1 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2)^{-1} \right]$$

$$\tau_g = e^{-0.0127 m_a^{0.26}} \quad \text{Outros gases da atmosfera}$$

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U_1 \left[(1 + 79.034 U_1)^{0.6828} + 6.385 U_1 \right]^{-1} \quad \text{Água}$$

$$\tau_a = e^{-l_{ao}^{0.873} (1 + l_{oa} - l_{ao}^{0.7808}) m_a^{0.9108}} \quad \text{Aerossóis}$$

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE IQBAL

$$\dot{I}_n = 0.9751 E_o \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

$$m_a = m_r \left(\frac{p}{1013.25} \right)$$

m_a air mass at actual pressure

m_r air mass at standard pressure (1013.25 mbar)

p (mbar) is the local air-pressure

$$U_3 = l_{oz} m_r$$

U_3 (cm) ozone's relative optical-path length

l_{oz} (cm) is the vertical ozone-layer thickness

$$U_1 = w m_r$$

U_1 (cm) optical-path length of precipitable water

$$w = w' \left(\frac{p}{1013.25} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{273}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

w (cm) is the precipitable water-vapour thickness

water-vapour thickness under the actual condition w'

$$l_{ao} = 0.2758 l_{ao; \lambda | \lambda = 0.38 \mu m} + 0.35 l_{ao; \lambda | \lambda = 0.5 \mu m} \quad \text{aerosol optical thickness}$$

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE IQBAL

$$\dot{I}_n = 0.9751 E_o \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

$$\dot{I}_b = \cos\theta_z \dot{I}_n$$

$$\dot{I}_d = \dot{D}_r + \dot{D}_a + \dot{D}_m$$

Rayleigh

$$\dot{D}_r = \frac{0.79 \dot{I}_{sc} \sin\alpha \tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa} 0.5(1 - \tau_r)}{1 - m_a + m_a^{1.02}} \quad \tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_o)(1 - m_a + m_a^{1.06})(1 - \tau_a)$$

Aerossóis

$$\dot{D}_a = \frac{0.79 \dot{I}_{sc} \sin\alpha \tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa} F_c (1 - \tau_{as})}{1 - m_a + m_a^{1.02}} \quad \tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{aa}}$$

Reflexões múltiplas

$$\dot{D}_m = \frac{(\dot{I}_n \sin\alpha + \dot{D}_r + \dot{D}_a) \rho_g \rho_a}{1 - \rho_g \rho_a} \quad \rho_a = 0.0685 + (1 - F_c) (1 - \tau_{as})$$

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE IQBAL

$$\dot{I}_n = 0.9751 E_o \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

$$\dot{I}_b = \cos\theta_z \dot{I}_n$$

$$\dot{I}_d = \dot{D}_r + \dot{D}_a + \dot{D}_m$$

$$\dot{I}_t = \dot{I}_b + \dot{I}_d = \left(\dot{I}_n \cos\theta_z + \dot{D}_r + \dot{D}_a \right) \left(\frac{1}{1 - \rho_g \rho_a} \right)$$

Pelo que podemos determinar a irradiância global (direta + difusa) numa superfície horizontal.

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE ASRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

$$\dot{I}_n = (C_n) A e^{-\frac{B}{\sec\theta_z}}$$

$$\dot{I}_d = C \dot{I}_n F_{ss} \quad C = \frac{\dot{I}_d}{\dot{I}_n}$$

angle factor between the surface and the sky

$$F_{ss} = \frac{1 + \cos\zeta}{2}$$

ζ (degrees) is the tilt angle of a surface

measured from the horizontal.

Date	A (W m ⁻²)	B (W m ⁻²)	C (W m ⁻²)
21 Jan	1230	0.142	0.058
21 Feb	1215	0.144	0.060
21 Mar	1186	0.156	0.071
21 Apr	1136	0.180	0.097
21 May	1104	0.196	0.121
21 Jun	1088	0.205	0.134
21 Jul	1085	0.207	0.136
21 Aug	1107	0.201	0.122
21 Sep	1152	0.177	0.092
21 Oct	1193	0.160	0.073
21 Nov	1221	0.149	0.063
21 Dec	1234	0.142	0.057

Existem outros coeficientes determinados por outros autores para diversas regiões do planeta.

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE ASRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

$$\dot{I}_n = (C_n) A e^{-\frac{B}{\sec\theta_z}}$$

$$\dot{I}_d = C \dot{I}_n F_{ss}$$

$$\dot{I}_r = \dot{I}_{t;\theta=0} \kappa_g F_{sg}$$

κ_g (dimensionless) is the reflectance of the foreground,
angle factor between the surface and the earth.

$$F_{sg} = \frac{1 - \cos\zeta}{2}$$

Date	A (W m ⁻²)	B (W m ⁻²)	C (W m ⁻²)
21 Jan	1230	0.142	0.058
21 Feb	1215	0.144	0.060
21 Mar	1186	0.156	0.071
21 Apr	1136	0.180	0.097
21 May	1104	0.196	0.121
21 Jun	1088	0.205	0.134
21 Jul	1085	0.207	0.136
21 Aug	1107	0.201	0.122
21 Sep	1152	0.177	0.092
21 Oct	1193	0.160	0.073
21 Nov	1221	0.149	0.063
21 Dec	1234	0.142	0.057

Existem outros coeficientes determinados por outros autores para diversas regiões do planeta.

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas

MODELO DE ASRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

$$\dot{I}_n = (C_n) A e^{-\frac{B}{\sec\theta_z}}$$

$$\dot{I}_d = C \dot{I}_n F_{ss}$$

$$\dot{I}_r = \dot{I}_{t;\theta=0} \kappa_g F_{sg}$$

$$\dot{I}_t = \dot{I}_n \cos\theta + \dot{I}_d + \dot{I}_r$$

Pelo que podemos determinar a irradiância global (direta + difusa) numa superfície horizontal.

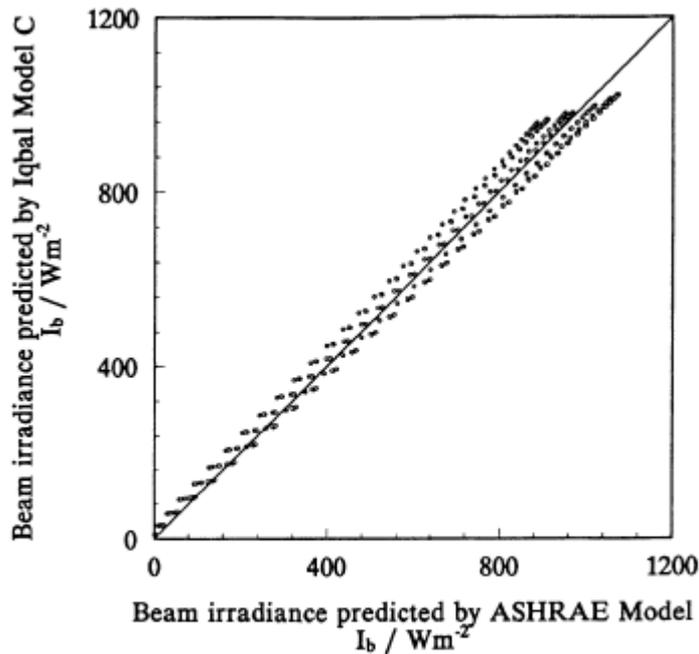
Date	A (W m ⁻²)	B (W m ⁻²)	C (W m ⁻²)
21 Jan	1230	0.142	0.058
21 Feb	1215	0.144	0.060
21 Mar	1186	0.156	0.071
21 Apr	1136	0.180	0.097
21 May	1104	0.196	0.121
21 Jun	1088	0.205	0.134
21 Jul	1085	0.207	0.136
21 Aug	1107	0.201	0.122
21 Sep	1152	0.177	0.092
21 Oct	1193	0.160	0.073
21 Nov	1221	0.149	0.063
21 Dec	1234	0.142	0.057

Existem outros coeficientes determinados por outros autores para diversas regiões do planeta.

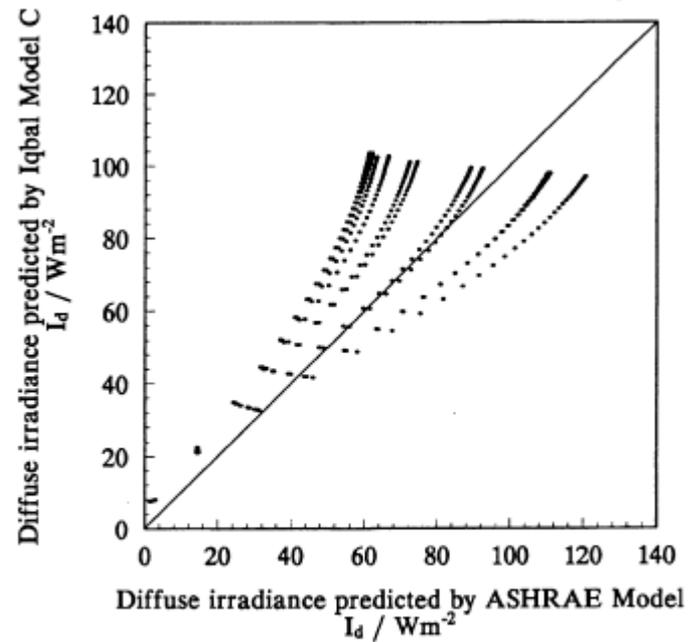
Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas



(a) Beam irradiance

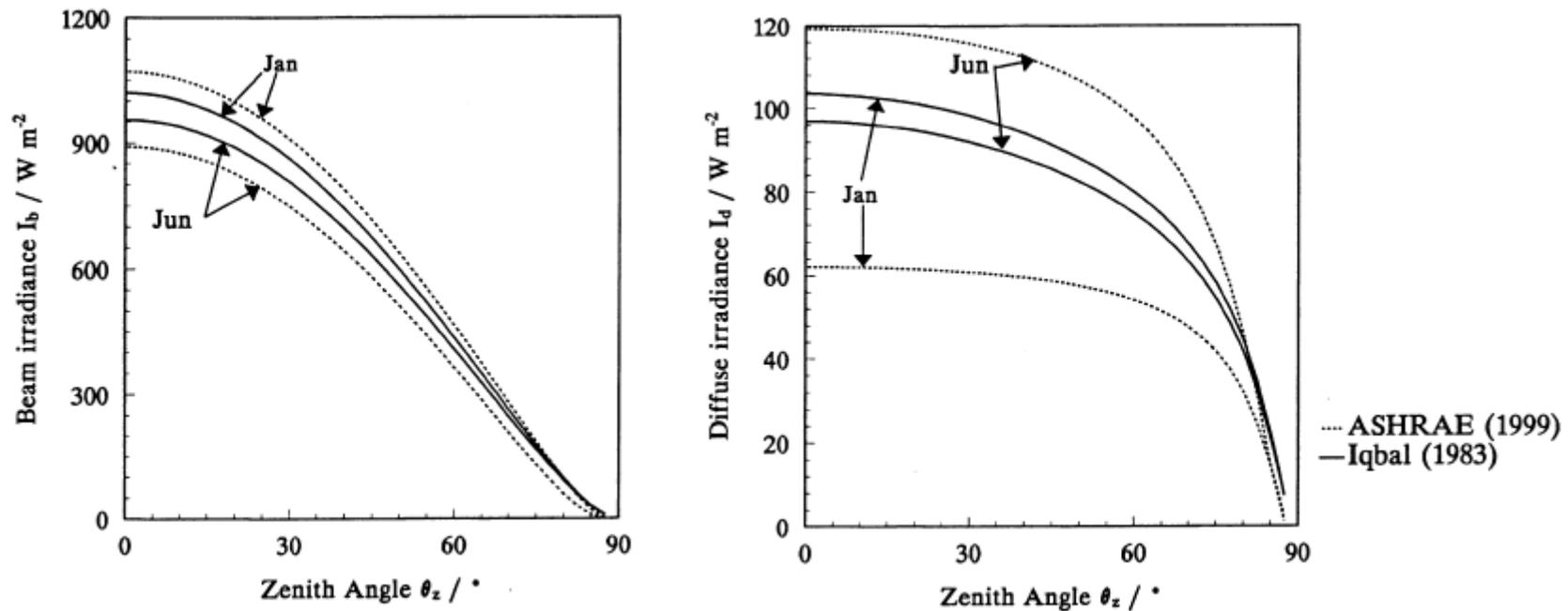


(b) Diffuse irradiance

Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

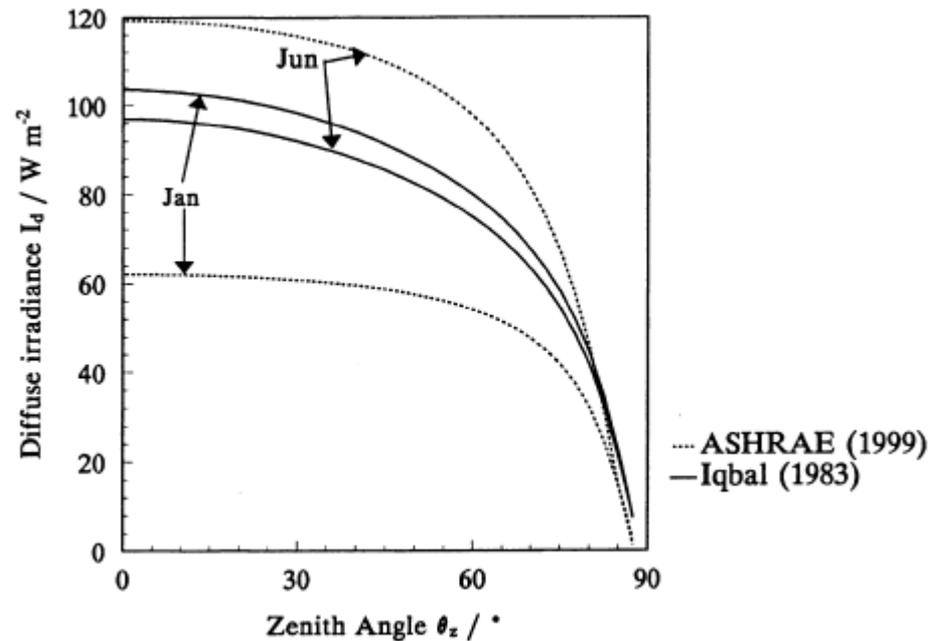
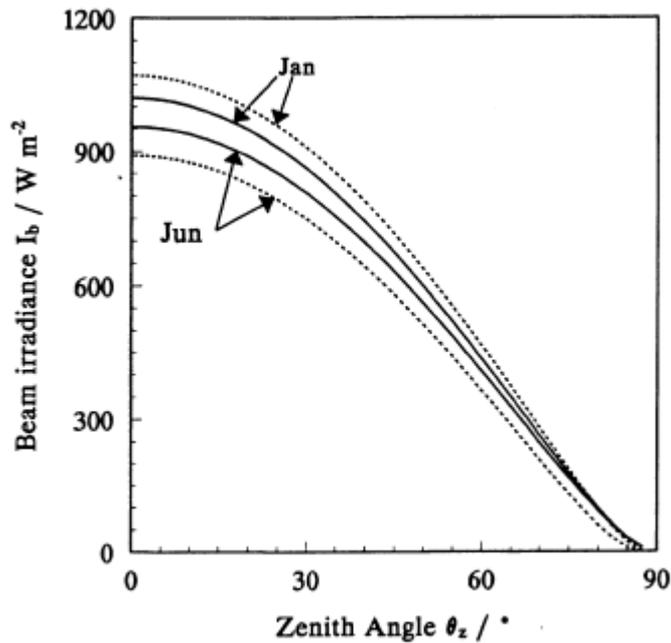
Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas



Radiação global na horizontal

Modelos paramétricos

Utilizam informação detalhada das condições atmosféricas



Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média diária a partir de horas de sol
 Porque é mais comum medir horas-de-sol do que radiação directa

Ångström A. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 1924;50:121–6.

Radiação global média diária

Radiação sem nuvens

\propto

Média mensal da
 fracção diária de nuvens

$$\frac{G_t}{G_c} = a_1 + (1 - a_1)S_f = a_1 + b_1S_f$$

sunshine fraction $S_f = \frac{S}{S_o}$

$$a_1 = 0.22$$

$$b_1 = 0.54.$$

“sunshine hours” S é definido
 como $>120 \text{ W/m}^2$

As constantes dependem de local para local!

O modelo assume que $a_1 + b_1 = 1$ mas os ajustes aos dados mostram que isso não é verdade devidos aos erros de medida das horas de sol

Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média diária a partir de horas de sol
 Porque é mais comum medir horas-de-sol do que radiação directa

Ångström A. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 1924;50:121–6.

Radiação global média diária

Radiação sem nuvens

\propto

Média mensal da
 fracção diária de nuvens

$$\frac{G_t}{G_c} = a_1 + (1 - a_1)S_f = a_1 + b_1S_f$$

Pode ser reescrito em função da irradiação extraterrestre

$$\frac{G_t}{G_o} = a_1 + b_1 \frac{S}{S_o}$$

$$G_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o \cos\phi \cos\delta \left[\sin\omega_s - \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s \cos\omega_s \right]$$

Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média diária a partir de horas de sol

Porque é mais comum medir horas-de-sol do que radiação directa

Ångström A. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 1924;50:121–6.

Radiação global média diária

Radiação sem nuvens

\propto

Média mensal da
fracção diária de nuvens

$$\frac{G_t}{G_c} = a_1 + (1 - a_1)S_f = a_1 + b_1 S_f$$

Pode ser reescrito em função da irradiação extraterrestre

$$\frac{G_t}{G_o} = a_1 + b_1 \frac{S}{S_o}$$

$$\frac{G_t}{G_o} = 0.18 + 0.62 \frac{S}{S_o}$$

Bom para qualquer lugar
no mundo desde que

$$\frac{S}{S_o} < 0.4$$

Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média diária a partir de horas de sol
 Porque é mais comum medir horas-de-sol do que radiação directa

Ångström A. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 1924;50:121–6.

Radiação global média diária

Radiação sem nuvens

\propto

Média mensal da
fracção diária de nuvens

$$\frac{G_t}{G_o} = a_1 + b_1 \frac{S}{S_o}$$

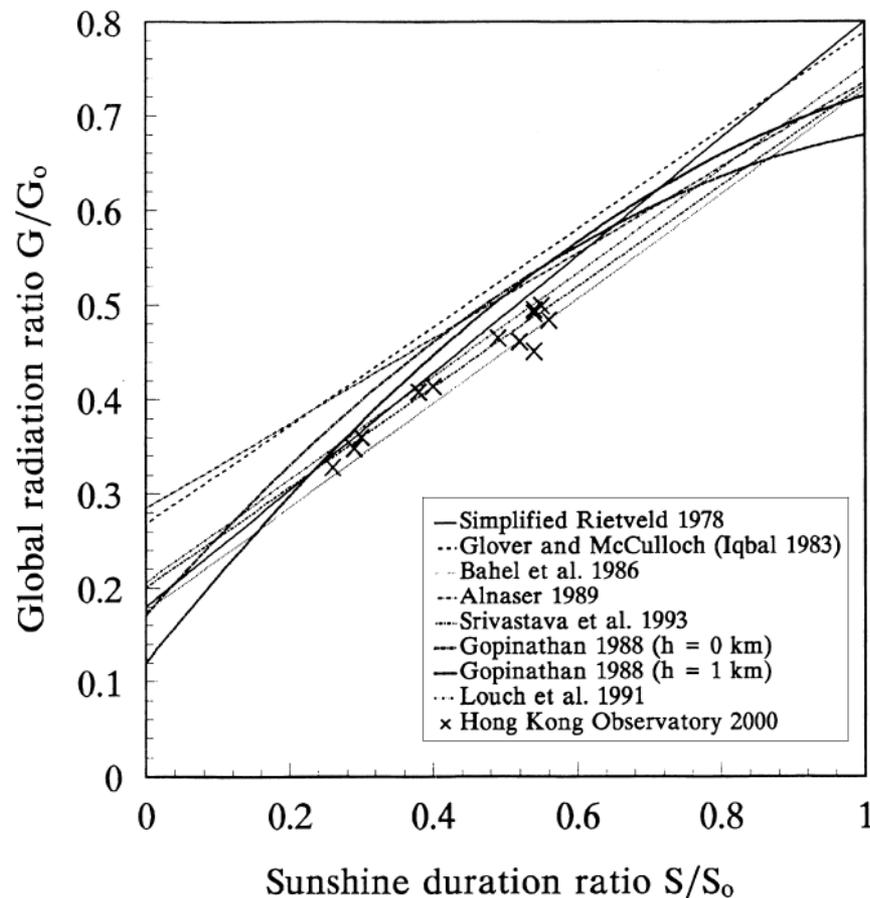
Podemos ainda introduzir correções para a latitude e elevação:

$$a_1 = -0.309 + 0.539 \cos \phi - 0.0693h + 0.29 \frac{S}{S_o}$$

$$b_1 = 1.527 - 1.027 \cos \phi + 0.0926h - 0.359 \frac{S}{S_o}$$

Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média diária a partir de horas de sol
Porque é mais comum medir horas-de-sol do que radiação directa



Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média diária a partir das nuvens

Por outro lado podemos tentar correlacionar a radiação difusa/global com a cobertura de nuvens

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = a_2 - b_2 \bar{C}$$

em que \bar{C} é a média mensal da fracção de cobertura de nuvens durante as horas do dia (solar).

Um modelo melhor, para uma gama alargada de localizações é

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = 0.803 - 0.340\bar{C} - 0.458\bar{C}^2 \quad \text{with } \bar{C} \leq 0.8$$

Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média diária a partir das nuvens

Esta abordagem é menos rigorosa do que a anterior porque

- ❑ A cobertura de nuvens é feita regularmente mas tipicamente com intervalos de 3 horas
- ❑ A relação com a cobertura de nuvens é um parâmetro não linear (uma pequena nuvem pode limitar seriamente a radiação directa, se estiver no sítio errado)
- ❑ A reflexão da radiação nos bordos das nuvens pode aumentar e não diminuir a radiação (efeito de concentração)



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Solar Energy 110 (2014) 168–173

**SOLAR
ENERGY**
www.elsevier.com/locate/solener

Brief Note

Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil

 Marcelo Pinho Almeida ^{a,*}, Roberto Zilles ^a, Eduardo Lorenzo ^b
^a *Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, Brazil*
^b *Grupo de investigación en Sistemas Fotovoltaicos, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Spain*

Received 28 February 2014; received in revised form 15 July 2014; accepted 8 September 2014

Available online 29 September 2014

Communicated by: Associate Editor Christian A. Gueymard

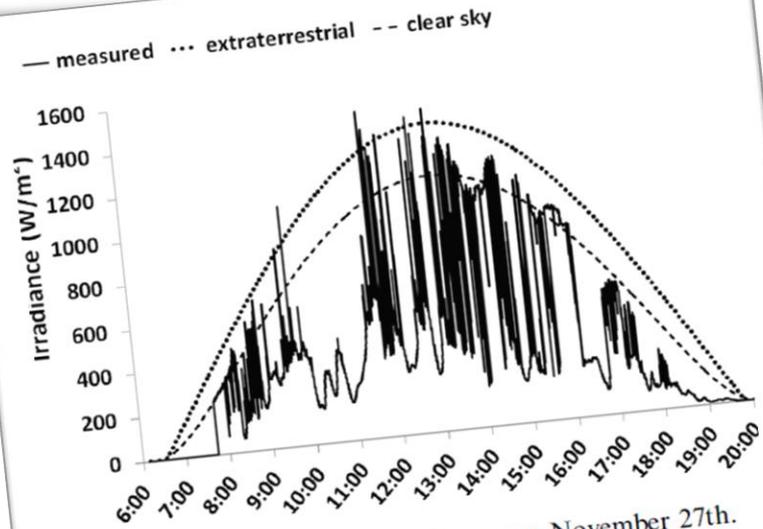


Fig. 3. Global horizontal irradiance on November 27th.

ena of overirradiance have been pointed all over the World. This note presents the most extreme enhancement event reported which contains an irradiance reading of 1590 W/m^2 measured in São Paulo (latitude $23^\circ 32'S$) at relatively low altitude (760 m



Fig. 1. Examples of sky conditions around 13:00 on November 27th, but they do not necessarily represent the moments of maximum irradiance.

Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média horária a partir de radiação média diária

Interessante porque geralmente apenas estão disponíveis dados diários.

$$r_t = \frac{I_t}{G_t} = \frac{I_o}{G_o} (a_2 + b_2 \cos \omega_I) = \frac{\pi}{24} \left(\frac{\cos \omega_I - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \pi \frac{\omega_s}{180} \cos \omega_s} \right) (a_2 + b_2 \cos \omega_I)$$

$$a_2 = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$b_2 = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 1979;22(2):155–64.

Radiação global na horizontal

Modelos para a previsão de radiação média horária a partir de radiação média diária

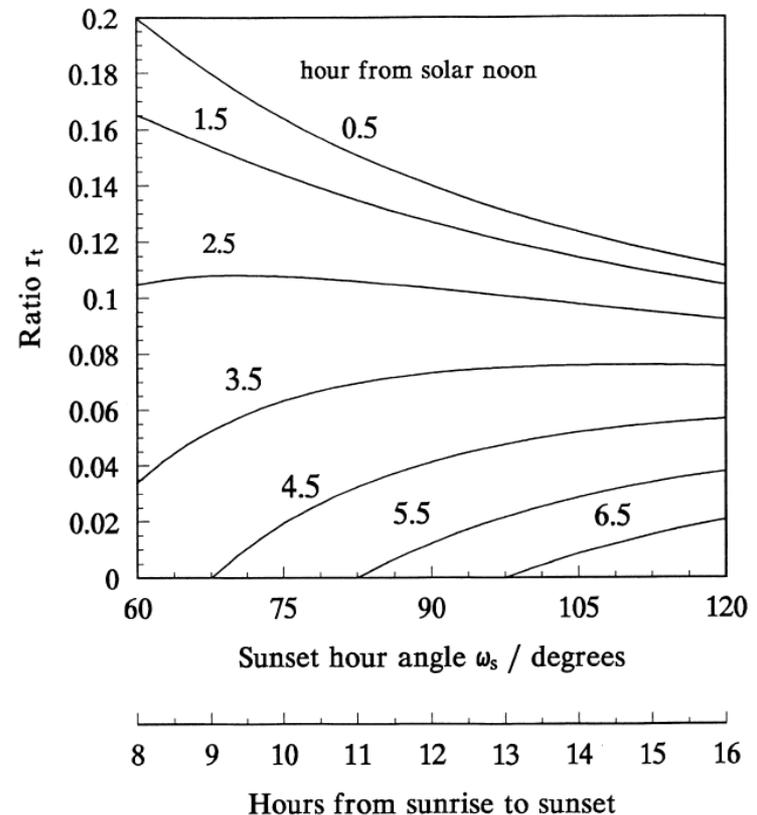
Interessante porque geralmente apenas estão disponíveis dados diários.

$$r_t = \frac{I_t}{G_t} = \frac{I_o}{G_o} (a_2 + b_2 \cos \omega_t)$$

$$a_2 = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$b_2 = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

Este resultado é independente do local no planeta!



Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Ajudam a determinar radiação horária direta e difusa a partir da medida de radiação global na horizontal – dados mais comumente medidos.

A estimativa das componentes direta e difusa é essencial para determinar a radiação global num plano inclinado. (E ainda útil para outras aplicações, e.g. dimensionamento de sistemas com concentração solar que só utilizam radiação direta.)

De facto o problema é a determinação da radiação difusa pois, uma vez resolvido esse problema, conhecida a radiação global é trivial calcular a radiação direta: é a diferença entre as outras!

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Liu & Jordan 1960 observaram que $\frac{I_d}{I_o} = 0.271 - 0.2939 \frac{I_b}{I_o}$

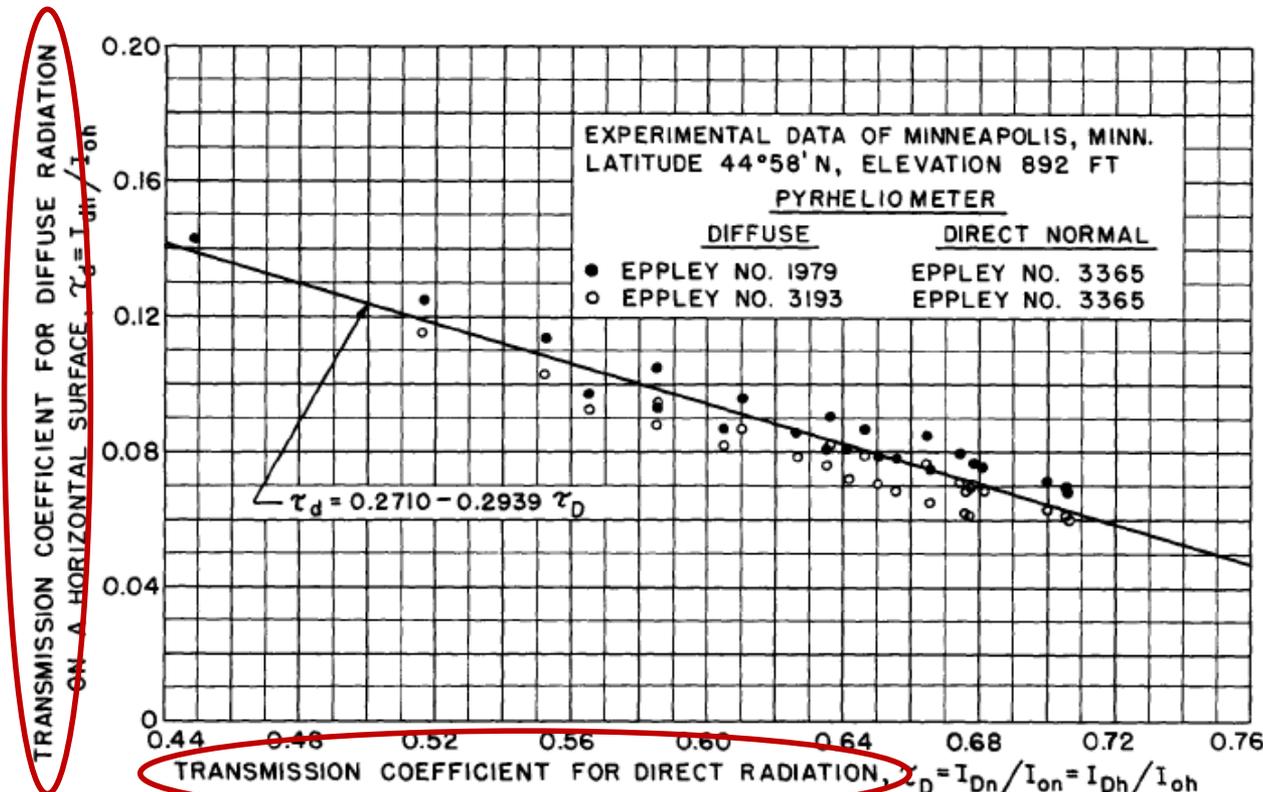


FIG. 3—Comparison of the empirical relation between the intensities of direct and diffuse radiation on a horizontal surface derived from the data for Hump Mountain, N. C., with the data for Minneapolis, Minn.

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Liu & Jordan 1960 observaram que $\frac{I_d}{I_o} = 0.271 - 0.2939\frac{I_b}{I_o}$

Ora, como

$$\frac{I_t}{I_o} = (I_b + I_D)/I_o$$

Vem

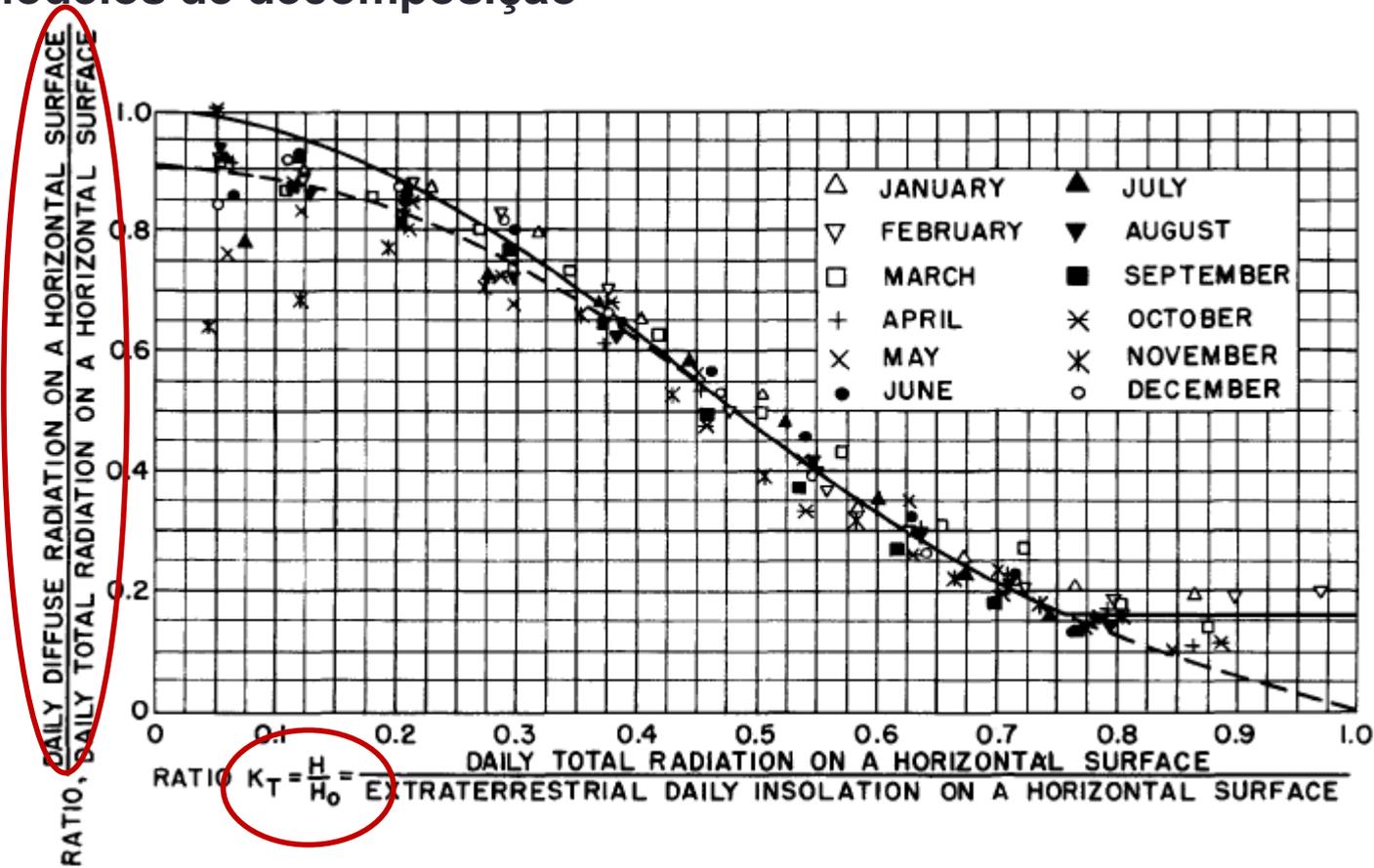
$$\frac{I_d}{I_o} = 0.384 - 0.416\frac{I_t}{I_o}$$

Pelo que podemos calcular a radiação difusa I_d conhecendo a radiação total I_t (e calculando a radiação extraterrestre I_o)

Mais interessante ainda foi terem observado que existe uma relação entre os rácios das radiações global/extraterrestre e as radiações difusa/global

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição



Mais interessante ainda foi terem observado que existe uma relação entre os rácios das radiações global/extraterrestre e as radiações difusa/global

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Modelo de Ruth & Chant

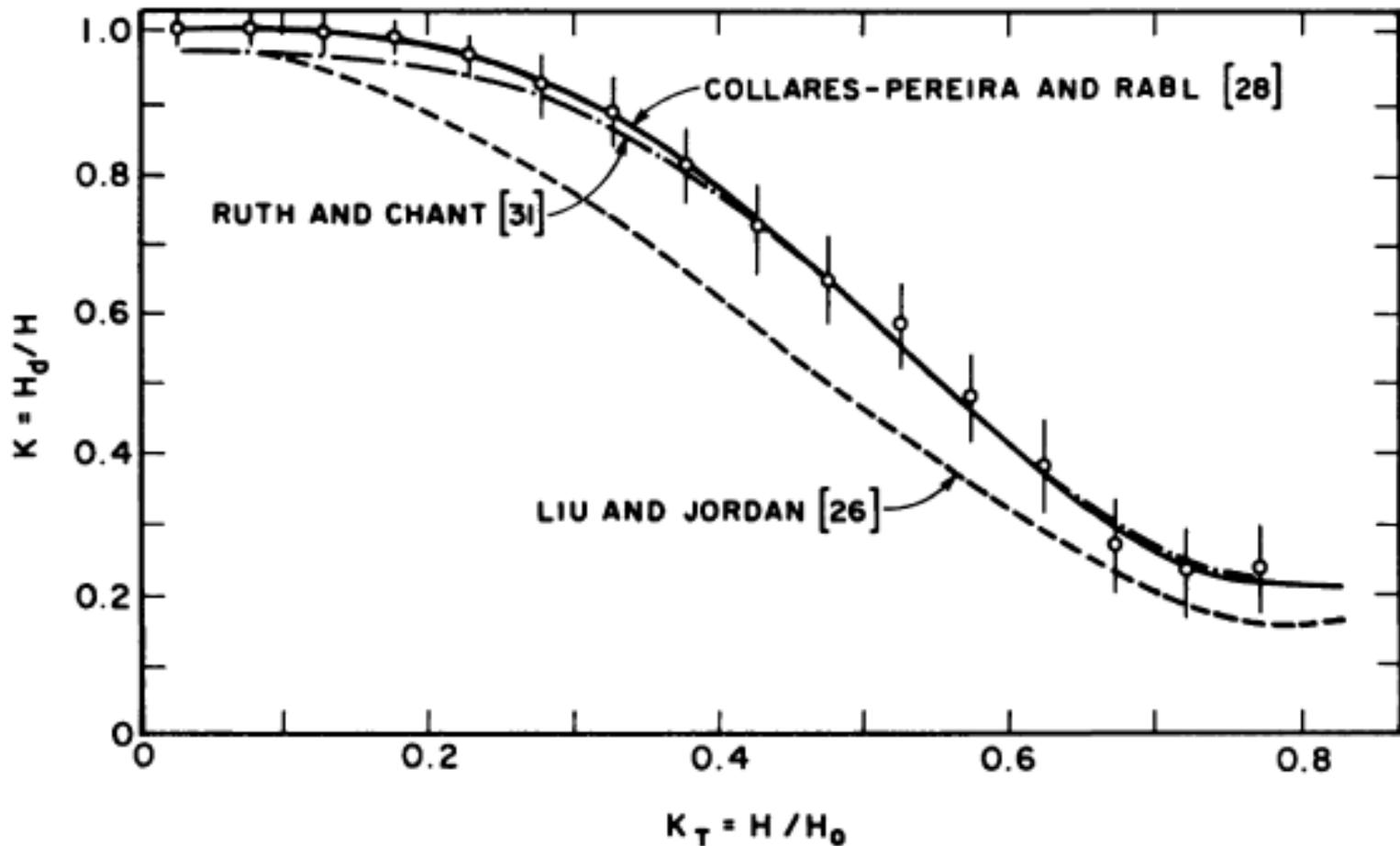
$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.98 & K_T \leq 0.1, \\ 0.910 + 1.154K_T - 4.936K_T^2 + 2.848K_T^3, & 0.1 \leq K_T \leq 0.7. \end{cases}$$

Modelo de Collares Pereira

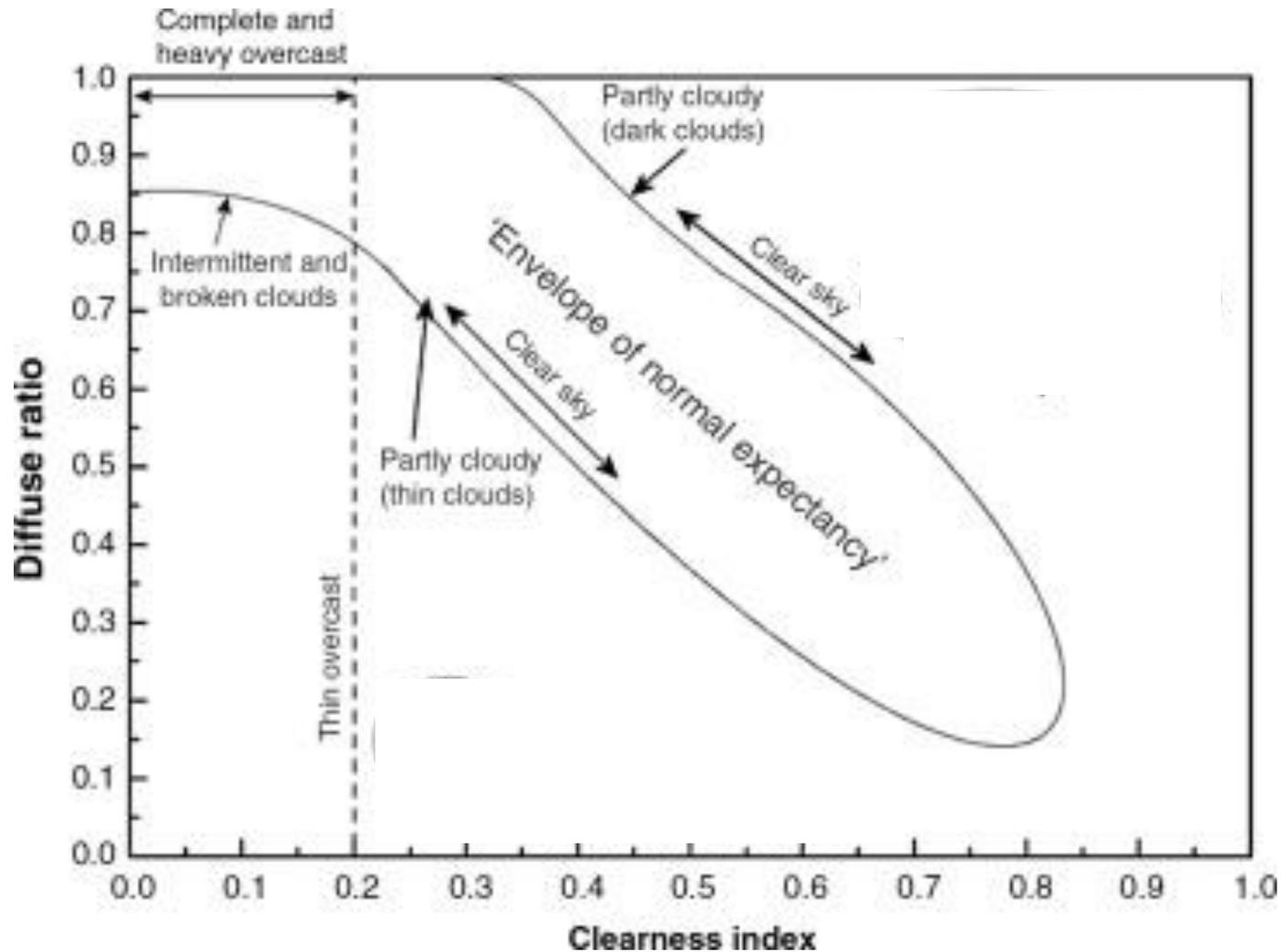
$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99, & K_T \leq 0.17, \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4, & 0.17 \leq K_T \leq 0.8. \end{cases}$$

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição



Radiação global na horizontal



Radiação global na horizontal

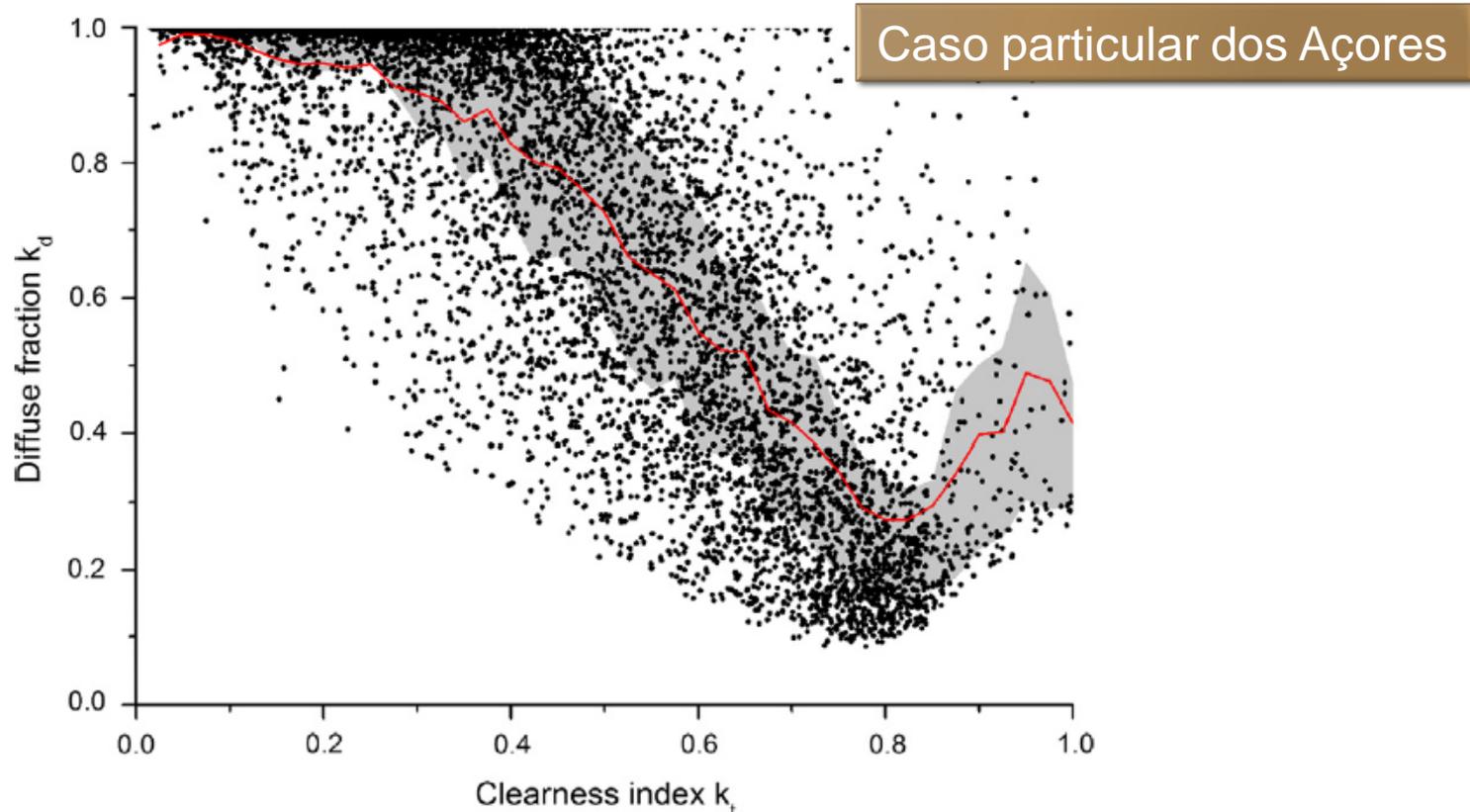
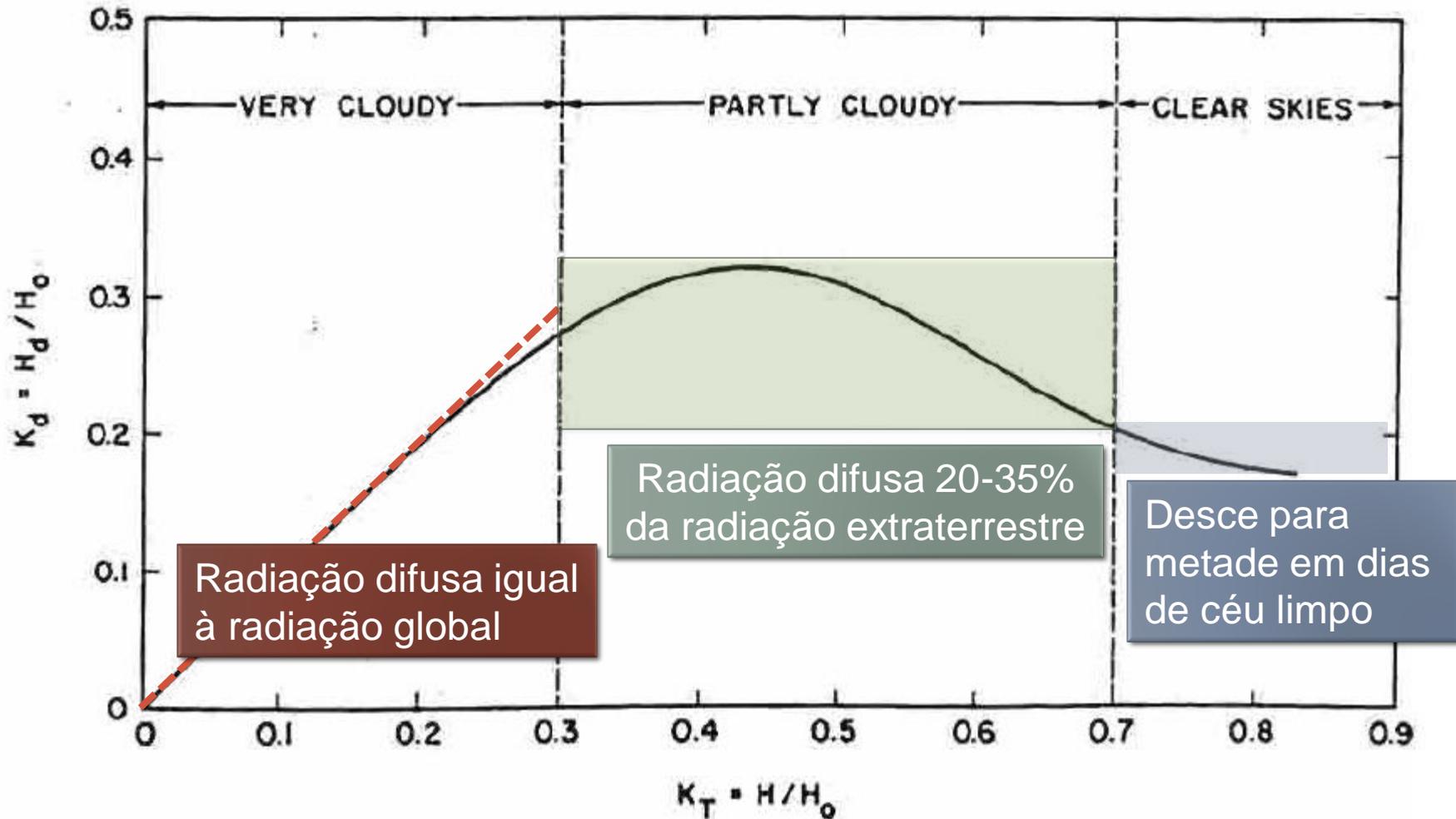


Fig. 2. The hourly diffuse fraction k_d (measured values) as a function of clearness index k_t . Grey region represents the band between the 25th and 75th quantile and in red is the mean line. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Radiação global na horizontal



Estas curvas também podem ser feitas para radiação horária e não diária

Radiação global na horizontal

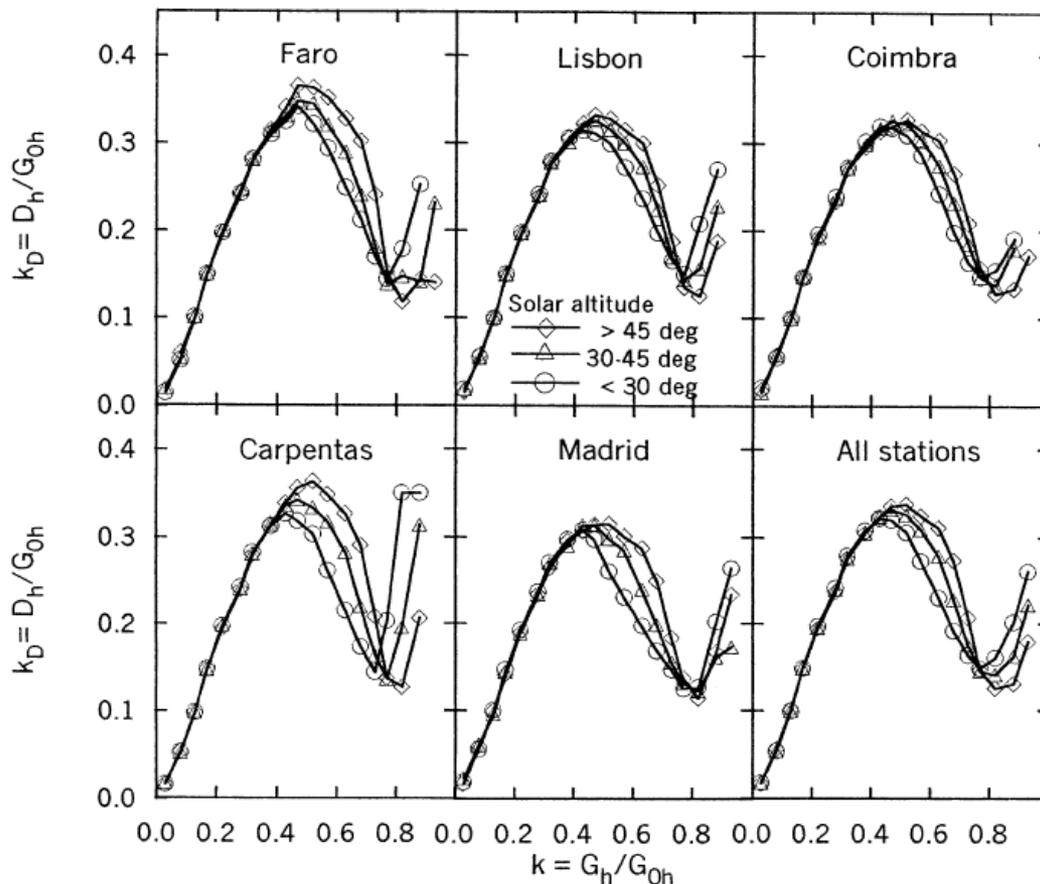


Fig. 1. Experimental hourly diffuse clearness index k_D (D_h/G_{0h}) as a function of the hourly global clearness index k (G_h/G_{0h}) for various solar altitude intervals.

A componente de radiação difusa de facto varia com a localização e a elevação solar.

A radiação difusa depende não apenas do **clearness index** e da **elevação solar** mas pode também depender de outros parâmetros meteorológicos como cobertura nuvens, turbidez da atmosfera, temperatura ou até o conteúdo de água na coluna atmosférica

Radiação global n

Cada um destes ajustes revela-se mais adequado para diferentes regiões/climas

Models	k_d	Intervals
Erbs et al.	$1.0 - 0.09 k_t$	$k_t \leq 0.22$
	$0.951 - 0.1604 k_t + 4.388 k_t^2 - 16.638 k_t^3 + 12.336 k_t^4$	$0.22 < k_t \leq 0.80$
	0.165	$k_t > 0.80$
Soares et al.	1.0	$k_t \leq 0.17$
	$0.90 + 1.1 k_t - 4.5 k_t^2 + 0.01 k_t^3 + 3.14 k_t^4$	$0.17 < k_t \leq 0.75$
	0.17	$k_t > 0.75$
Chandrasekaran and Kumar	1.0	$k_t \leq 0.24$
	$0.97 + 0.80 k_t - 3.00 k_t^2 - 3.10 k_t^3 + 5.2 k_t^4$	$0.24 < k_t \leq 0.80$
	0.17	$k_t > 0.80$
Karatasou et al.	$0.9995 - 0.05 k_t - 2.4156 k_t^2 + 1.4926 k_t^3$	$k_t \leq 0.78$
	0.17	$k_t > 0.78$
	$0.995 - 0.081 k_t$	$k_t \leq 0.21$
Miguel et al.	$0.724 + 2.738 k_t - 8.32 k_t^2 + 4.967 k_t^3$	$0.21 < k_t \leq 0.76$
	0.18	$k_t > 0.76$
	$1.012 - 0.248 k_t$	$k_t \leq 0.3$
Reindl et al.	$1.45 - 1.67 k_t$	$0.3 < k_t \leq 0.78$
	0.147	$k_t > 0.78$