

ESTIMATIVAS DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA NORMAL ATRAVÉS DE UM MODELO PARAMETRIZADO, NA AUSÊNCIA DE NUVENS

Elza Correia Sucharov
Professora. Adjunto - Dept^o de Meteorologia

Marcelo Barbio Rosa
Mestrando do Inst.Nac.de Pesquisas Espaciais, INPE.

ABSTRACT

The hourly and daily of direct radiation under cloudless skies are estimated for Januaria, State of Minas Gerais, Brazil, using the parameterization Model C presented by Iqbal (1983). This model takes into account absorption of radiation by molecules such as O₃, H₂O and the uniformly mixed gases. Attenuation by Rayleigh scattering and aerosol extinction are included. Aerosol attenuation is calculated through of the visibility atmospheric. The input parameters include the ozone content, visibility, hourly temperature, pressure and relative humidity data. Measured values of the direct solar radiation from May through July 1992 were used to validate the model. The hourly and daily values for the Model compared very well with measured values for clear days, showing an accuracy better than 1 per cent for daily values and 4 per cent for hourly values in the main radiation period (9-16 hours). The parameterization of the transmittance of the various atmospheric constituents are also analyzed. Results are presented to show the effect of variation of water vapor content and visibility.

1 - INTRODUÇÃO

A energia solar recebida na superfície da Terra é um parâmetro importante e fundamental no mundo de hoje, principalmente em países predominantemente tropicais e de grande extensão territorial como o Brasil. Os dados de radiação solar são usados em diversas áreas de conhecimento, incluindo climatologia, biologia, agricultura, micrometeorologia, glaciologia, planejamento urbano, arquitetura, e em projetos ambientais e de engenharia mecânica.

O conhecimento da componente direta da radiação solar é particularmente crítico nos projetos de coletores concentradores de energia e de painéis fotovoltaicos, que são sempre posicionados apontando para o sol. A medida sistemática da radiação solar direta inexistia no Brasil até recentemente quando, então, a Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG iniciou tal procedimento na estação de Januária, Estado de Minas Gerais. Mesmo nos Estados Unidos, a disponibilidade dessas medidas é precária. Lá, eles geraram uma base de dados a serem usados em projetos de aproveitamento da energia solar, conhecida por SOLMET /TMY (1978), que consiste inteiramente de dados de radiação direta gerados a partir de modelos de conversão da radiação global em direta. Esses modelos, entretanto, têm sido questionados por

alguns pesquisadores, o que levou o Instituto de Pesquisa de Energia Solar do EUA a desenvolver um novo algoritmo para aumentar a acurácia do SOMET/TMY, Maxwell (1987) e Stewart (1988).

A melhor base de dados para os projetos de sistemas de conversão da energia solar são, naturalmente, as séries de longo prazo da radiação solar direta obtidas no local da instalação do sistema. Entretanto, o número limitado de estações que realizam estas medidas dita a necessidade do desenvolvimento de alternativas que possam substituir ou complementar essas observações. Os modelos de estimativa da radiação solar direta podem satisfazer com sucesso esta necessidade, especialmente os modelos parametrizados que utilizam informações das condições atmosféricas, em geral, de fácil obtenção.

Os modelos parametrizados, são baseados na física envolvida na interação entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos, e situam-se entre as abordagens puramente teóricas usadas em modelos rigorosos baseados na solução da equação de transferência radiativa e as abordagens empíricas usadas em modelos de regressão. Os parâmetros meteorológicos frequentemente usados como previsores incluem o tipo, quantidade e distribuição de nuvens e outras informações tais como temperatura, umidade, pressão e turbidez atmosférica. A disponibilidade de tais modelos na literatura é apreciável, principalmente para a condição de céu claro (ausência de nuvens). Este fato não é originado apenas pela menor complexidade dos cálculos mas também porque a condição de céu claro produz a máxima disponibilidade de energia. Este máximo estabelece o critério a ser utilizado por engenheiros no projeto de equipamentos para a utilização da energia solar (células solares, aquecimento e resfriamento de ambientes, etc.) e também no desenvolvimento de materiais para aplicações solares que retardem a deteriorização dos plásticos.

Nesta linha de pesquisa podem ser citados Rizzi et al.(1980) que desenvolveram um modelo parametrizado usando como previsores da radiação direta a água precipitável e a espessura ótica dos aerossóis, os modelos espectrais de Hatfield et al. (1981) e Brine & Iqbal (1983), o modelo de Sherry & Justus (1983) para o cálculo da radiação direta horária, os modelos A, B e C para o cálculo da radiação direta instantânea propostos por Iqbal (1983), o modelo de duas bandas (banda UV/Visível, 0.29 - 0.7 μ m e banda IV, 0.7- 2.7 μ m) de Gueymard (1989) e o modelo de Moriarty (1991) adaptado para a Austrália.

Neste trabalho, a radiação solar direta normal horária e diária são estimadas adaptando-se o modelo parametrizado para a condição de céu claro (sem nuvens), denominado de C por Iqbal (1983).

A validade do modelo foi testada utilizando-se dados de radiação direta medidos na Estação Meteorológica de Januária (15° 25'S, 44° 22'W, 477.58 m), Estado de Minas Gerais, no período de maio a julho de 1992, cedidos pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Os dados atmosféricos empregados no modelo (pressão, umidade relativa e visibilidade referentes às 12 e 18 GMT) foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

2 - METODOLOGIA

2.1. Descrição do Modelo

O Modelo tem por base os estudos desenvolvidos por Bird e Hulstron (1980, 1981). Eles fizeram uma comparação detalhada entre o modelo SOLTRAN, que foi construído a partir do modelo LOWTRAN desenvolvido por Selby & McClatchey (1975) e Selby et al. (1978), com vários modelos que calculam a radiação direta. Com base nestas comparações foram desenvolvidas as equações parametrizadas para a transmitância da radiação direta considerando o espalhamento pelas moléculas de ar denominado espalhamento Rayleigh, o espalhamento e absorção pelos aerossóis, a absorção da camada de ozônio, a absorção pelos gases (ex. CO₂, O₂), e a absorção pelo vapor d'água.

As equações parametrizadas que contabilizam essas transmitâncias foram desenvolvidas com base na aproximação de banda larga (broadband approach) abrangendo o intervalo espectral de 0.29 a 4.0µm e na distribuição espectral extraterrestre obtida pela NASA/ASTM e também em dados mais antigos.

A radiação direta normal instantanea é calculada pela expressão:

$$I_n = 0,9751 E_o I_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad (1)$$

onde, I_{sc} é a constante solar, E_o é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, τ_r é a transmitância para a radiação direta devido ao espalhamento produzido pelas moléculas de ar (Rayleigh), τ_o é a transmitância para a radiação direta devido a absorção do ozônio, τ_g é a transmitância para a radiação direta devido à absorção dos gases misturados, τ_w é a transmitância para a radiação direta devido à absorção do vapor d'água e τ_a é a transmitância para a radiação direta devido ao espalhamento e absorção dos aerossóis.

O fator de correção da excentricidade da órbita terrestre é calculado a partir da fórmula de Spencer (1971), com um erro máximo de 0.0001, pela expressão:

$$E_o = 1.000110 + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.001280 \sin(\Gamma) \\ + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma), \quad (2)$$

sendo Γ o ângulo diário dado pela seguinte expressão:

$$\Gamma = [2 \pi (d_n - 1)] / 365 \quad (3)$$

onde d_n é o número de dias do ano, variando de 1 em 1º de janeiro a 365 em 31 de dezembro, considerando-se o mês de fevereiro sempre com 28 dias.

A transmitância devida ao espalhamento Rayleigh é parametrizada por:

$$\tau_r = \exp [-0.0903 m_r^{0.84} (1 + m_r - m_r^{1.01})] \quad (4)$$

onde m_r é a massa ótica relativa corrigida, calculada por :

$$m_r = m_r (p / 1013.25) \quad (5)$$

sendo m_r a massa ótica relativa. Esta é calculada pela expressão desenvolvida por Kasten (1966), usando o perfil de densidade do ar do Modelo Atmosférico ARDC de 1959, e o índice de refração no comprimento de onda de 0.7 μm ou seja:

$$m_r = [\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (6)$$

onde θ_z é o ângulo zenital do sol. A expressão que define o ângulo zenital é fundamentada em relações trigonométricas, tendo a seguinte forma, Iqbal (1983):

$$\theta_z = \cos^{-1}[\sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega)], \quad (7)$$

onde φ é a latitude do lugar, ω é o ângulo horário e δ é a declinação solar. A declinação solar pode ser considerada constante para o período de um dia, e é calculada pela fórmula de Spencer (1971), em radianos, como segue:

$$\delta = [0.006918 - 0.399912 \cos(\Gamma) + 0.070257 \sin(\Gamma) - 0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma)], \quad (8)$$

A transmitância devida à absorção do ozônio é obtida pela seguinte expressão:

$$\tau_o = 1 - [0.1611 U_3 (1.0 + 139.48 U_3)^{-0.3035} - 0.002715 U_3 (1.0 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3)^{-1}], \quad (9)$$

onde U_3 é o caminho ótico do ozônio, calculado por:

$$U_3 = l m_r, \quad (10)$$

e l é a espessura da camada vertical de ozônio em cm (CNTP).

A transmitância devida à absorção dos gases uniformemente misturados é calculada por:

$$\tau_g = \exp [-0.0127 m_a^{0.26}]. \quad (11)$$

A transmitância devida à absorção do vapor d'água é parametrizada por:

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U_1 [(1.0 + 79.034 U_1)^{0.6828} + 6.385 U_1]^{-1}, \quad (12)$$

onde U_1 é o caminho ótico da água precipitável, conforme Iqbal (1983):

$$U_1 = w m_r, \quad (13)$$

sendo, w , a água precipitável calculada, em centímetros, pela fórmula empírica desenvolvida por Leckner (1978), ou seja:

$$w = 0.493 \phi_r p_s T, \quad (14)$$

onde, ϕ_r é a umidade relativa na superfície, em frações de um, T é a temperatura na superfície em graus Kelvin, p_s é a pressão parcial do vapor d'água no ar saturado, obtida pela seguinte equação semi-empírica, Iqbal (1983):

$$p_s = \exp [26.23 - (5416/T)]. \quad (15)$$

A parametrização proposta neste modelo para transmitância da radiação direta devido ao espalhamento e absorção dos aerossóis é baseada na atenuação espectral nos comprimentos de onda de 0.38 e 0.50 μm , onde a absorção molecular do ozônio é mínima. Caso estes dados não estejam disponíveis, a transmitância dos aerossóis pode ser calculada em função da visibilidade através da expressão apresentada por Machler (1983), que apresenta boa acurácia para visibilidades entre 5 e 180 km:

$$\tau_a = [0.97 - 1.265 (\text{Vis})^{0.66}]^{0.9} m_a \quad (16)$$

2.2. Cálculo da Radiação Direta Normal Horária e Diária

Na estimativa da radiação direta normal horária utilizou-se o seguinte procedimento: do nascer ao por do sol, calculou-se o ângulo zenital horário médio, considerando-se o ângulo horário médio em cada intervalo de hora.

Os ângulos zenitais horários foram então utilizados para o cálculo das massas óticas relativas, que por sua vez foram empregadas nos cálculos das várias transmitâncias, em cada intervalo de hora. Os valores horários foram somados para a obtenção dos totais diários.

2.3 - Dados Horários de Pressão e Umidade Relativa

Devido a ausência dos dados horários de pressão e umidade relativa, surgiu a necessidade do desenvolvimento de modelos que simulassem o comportamento desses dados entre o nascer e o por do sol. A metodologia utilizada para a obtenção dos modelos acima citados é descrita nos itens a seguir:

a) Pressão Atmosférica

De acordo com Hastenrath (1988), a onda de pressão mais importante nas regiões tropicais, apresenta um período de 12 horas entre dois máximos consecutivos. Esta onda tem sua maior amplitude ao redor de 1 hPa no Equador, e diminui em direção ao pólo em ambos os

Hemisférios. Seu sentido é de este para oeste de tal modo que, em qualquer localidade, a máxima será experimentada ao redor das 10 e 22 horas e a mínima em torno das 4 e 16 horas locais. Este comportamento só é válido para condições de tempo estável, já que em entradas de frentes a marcha da onda de pressão pode vir a ser alterada, apresentando, máximos ou mínimos em horários outros que os acima citados.

Com base nestas informações, desenvolveu-se uma equação semi-empírica, de caráter senoidal, com a seguinte forma:

$$P_{hor} = A \cos [(2\pi/12)(H - 10)] + B, \quad (17)$$

onde, H é a hora local, A e B são constantes determinadas a partir dos dados de contorno (pressão às 9 e 15 horas locais), como segue:

$$A = (P_9 - P_{15}) / \{ \cos [(2\pi/12)(9 - 10)] - \cos [(2\pi/12)(15 - 10)] \} \quad (18)$$

$$B = P_{12} - A \cos [(2\pi/12)(9 - 10)] \quad (19)$$

b) Umidade Relativa

A umidade relativa é definida como a relação entre a razão de mistura observada e aquela que prevaleceria em condições saturada à mesma temperatura, Vianello & Alves, (1991). É expressa em porcentagem e pode também ser calculada em função da pressão parcial (e) e de saturação do vapor d'água (e_s), como segue :

$$U\% \cong 100 e / e_s, \quad (20)$$

onde a pressão parcial do vapor d'água é calculada por:

$$e V = m_v R_v T, \quad (21)$$

sendo, V o volume, m_v a massa de vapor d'água, R_v a constante específica do vapor d'água e T a temperatura do ar.

A pressão de saturação do vapor d'água pode ser obtida com base na temperatura do ar através da equação de Clausius-Clapeyron integrada, ou seja:

$$e_s = 6.107 \exp \{ (L_v/461.51) [(1/273.16) - (1/(273.16 + T))] \} \quad (22)$$

onde, T é a temperatura do ar seco e L_v é o calor latente de vaporização.

Escrevendo-se a equação de estado para o ar seco, tem-se que:

$$p_d V = m_d R_d T, \quad (23)$$

onde, p_d é a pressão parcial do ar seco, m_d é a massa do ar seco e R_d é a constante específica do ar seco.

Dividindo-se a equação (21) pela equação (23), vem que:

$$e/p_d = r/\epsilon, \quad (24)$$

sendo r , a razão de mistura dada por m_v/m_d e ϵ , a razão R_d/R_v , cujo valor é 0,622.

Por aproximação, a pressão parcial do ar seco pode ser considerada próxima a pressão atmosférica (Iribarne & Godson, 1981). Assim, pode-se expressar a razão de mistura considerando-se apenas a pressão parcial do vapor d'água e a pressão atmosférica, isto é:

$$e/p = r/\epsilon. \quad (25)$$

Para simular a variação da umidade relativa ao longo do dia, considerou-se o termo r/ϵ constante e igual a K . Com base nos dados da umidade relativa e da pressão de saturação do vapor d'água às 12 e 18 horas TMG, obtem-se um valor médio para K designado por K_m , da seguinte expressão:

$$k_m = [U_{12}(e_{s12}/p) + U_{18}(e_{s18}/p)] / 2, \quad (26)$$

onde, U é a umidade relativa em % e p é a pressão ao nível da estação (hPa).

Com o valor médio de K_m , calcula-se os valores horários da pressão do vapor d'água horária, por:

$$e_{hor} = K_m P_{hor}, \quad (27)$$

onde P_{hor} é a pressão horária ao nível da estação, calculada pela equação (17).

Finalmente, a umidade relativa horária, poderá ser estimada das expressões (20) e (27) por:

$$U_{hor} = (K_m P_{hor})/e_{s,hor} \quad (28)$$

onde $e_{s,hor}$ é calculada pela equação (22), a partir dos dados de temperatura horários.

3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados está estruturada da seguinte forma: análise dos totais diários da radiação direta normal, análise dos totais horários e análise do comportamento das transmitâncias dos diferentes constituintes da atmosfera.

Para a aplicação do modelos às condições atmosféricas de Januária, considerou-se a espessura da camada de ozônio e a visibilidade constantes e iguais, respectivamente, a 0.24 cm (Robinson, 1966) e 30 km (céu claro). O valor da constante solar empregado foi 1367 W m⁻². Este valor é adotado pelo Centro de Radiação Mundial (WRC) com base nos estudos de Fröhlich & Brusa (1981), que examinaram valores medidos entre 1969 e 1980.

Tendo em vista que o modelo foi desenvolvido para a condição de céu claro, foi necessário estabelecer um critério para a seleção dos dias com tal característica. Os dias selecionados para a aplicação do modelo foram aqueles em que a cobertura do céu não ultrapassou a 1/10 nas observações sinóticas das 12 e 18 horas TMG.

As estimativas dos totais diários de radiação direta normal, obtidas pelo modelo para os 35 dias selecionados no período de maio a julho de 1992 estão apresentadas na Tabela 1. Desta tabela constam também os totais diários da radiação direta normal e difusa medidos, bem como as discrepâncias, em percentagens, entre os valores medidos e os estimados pelo modelo. As percentagens negativas indicam que os valores estimados foram menores que os medidos.

A Tabela 1 mostra que as discrepâncias maiores que 5% ocorreram nos dias em que a relação entre a radiação difusa e direta normal estavam em torno de 15%, com exceção do dia 02-06 em que essa relação foi da ordem de 13,5%. Por outro lado, as melhores estimativas foram verificadas nos dias em que a mesma relação ficou em torno de 12%. Estes resultados sugerem que os dias selecionados como claros, apresentaram alguma nebulosidade em curtos períodos do dia.

Em virtude do critério utilizado para a seleção dos dias claros estar limitado a somente duas observações diárias (12 e 18 TMG), a verificação da acurácia do modelo através da comparação dos totais diários, pode conduzir a falsos resultados, uma vez que não fica descartada a hipótese de ocorrência de alguma nebulosidade ao longo do dia. Nesse caso, para um melhor julgamento da performance do modelo, foi necessário uma análise mais detalhada, com base nos valores horários de alguns dias da Tabela 1. Na seleção desses dias considerou-se a relação entre os valores diários da radiação direta normal e difusa, a resposta do modelo e o comportamento da radiação medida ao longo do dia. Assim, foram selecionados os dias 28/5, 7 e 9/6 (Período I) e os dias 23/5, 2 e 5/6 (Período II) correspondendo, respectivamente, aos resultados mais e menos satisfatórios.

Tabela 1: Radiação Solar em Wh/m²

Mês	Dia	Radiação Direta Normal		Radiação Difusa	Desvios (%)
		Modelo	Medida		
Maio	5	7408.0	7105.5	973.2	4.26
	12	7247.5	6959.8	930.2	4.13
	13	7267.8	6954.4	946.7	4.51
	16	7221.1	6762.7	1008.2	6.78
	19	7214.1	6813.4	996.3	5.88
	23	7109.6	6423.8	1010.7	10.68
	27	7040.0	6577.9	951.6	7.03
	28	7035.6	7094.3	862.3	-0.83

	29	7005.5	6866.5	843.6	2.02
	30	6974.6	6745.1	875.9	3.40
	31	6999.7	6957.1	892.2	0.61
Junho	1	6983.1	6926.6	896.3	0.82
	2	6959.5	6449.1	869.0	7.91
	4	7139.6	6677.8	905.8	6.92
	5	6911.4	6282.1	961.7	10.02
	6	6933.6	6731.6	913.6	3.00
	7	6948.7	7017.8	881.6	-0.98
	9	6913.8	9969.2	840.5	-0.79
	10	6906.0	6783.3	875.3	1.81
	11	6902.1	6530.3	885.4	5.69
	13	6876.3	6687.2	900.4	2.83
	15	6886.2	6670.1	943.1	3.23
	23	6832.3	6770.7	849.2	0.91
Julho	2	6879.6	6642.8	899.4	3.56
	7	6927.4	6954.0	888.7	-0.38
	9	6908.9	6834.3	907.3	1.09
	13	6989.2	6769.5	936.7	3.25
	14	6999.6	6784.2	927.5	3.18
	15	7016.0	6907.2	927.9	1.57
	16	7039.4	6911.7	917.1	1.85
	17	7051.9	6733.5	973.4	4.73
	20	7086.7	7040.5	919.2	0.66
	21	7125.6	7170.6	921.1	-0.63
	23	7127.2	6801.0	982.0	4.80
	31	7283.8	7103.6	992.5	2.54

No Período I, a radiação difusa diária foi cerca de 12% da radiação direta normal e no Período II essa relação ficou em torno de 15% (Tabela 2). No Período I o modelo subestimou a radiação diária em menos de 1%, e nos três dias do Período II, o modelo superestimou a radiação diária em até 10,7%, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Radiação Solar para dias claros e com alguma nebulosidade (Whm^{-2})

	Dia	Radiação Direta Normal		Radiação Difusa	Desvio (%)
		Modelo	Medido		
Período I	28-05	7035.6	7094.3	12.15	-0.83
	07-06	6948.7	7017.8	12.56	-0.98
	09-06	6913.8	6969.2	12.06	-0.79
Período II	23-05	7109.6	6423.8	15.73	10.68
	02-06	6959.5	6449.1	13.47	7.91
	05-06	6911.4	6282.1	15.31	10.02

As Figuras 1 (a,b,c) e 2 (a,b,c) mostram, respectivamente, os valores horários da radiação direta normal observada e estimada pelo modelo no Período I e II.

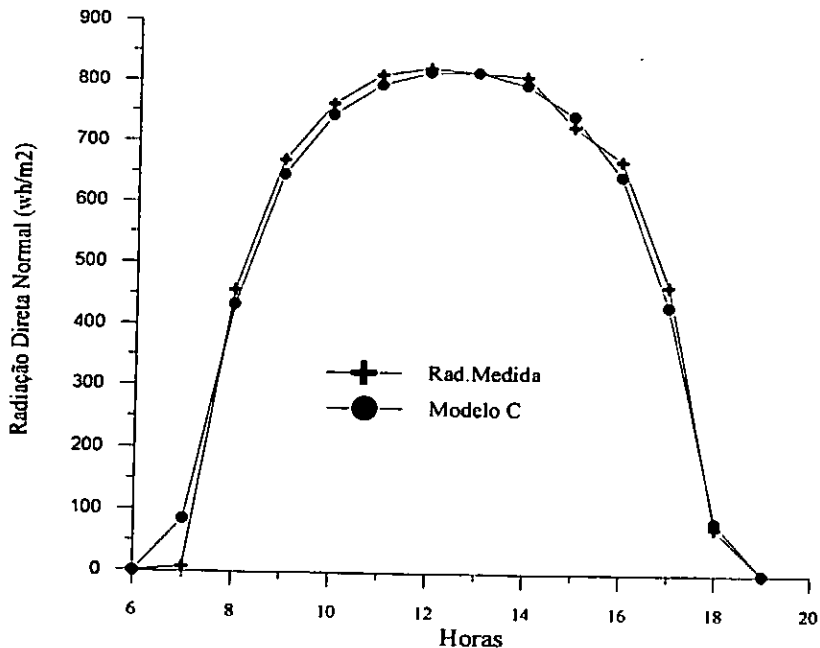


Figura 1a - Radiação Direta Medida e Estimada pelo Modelo C, em 28/5/92

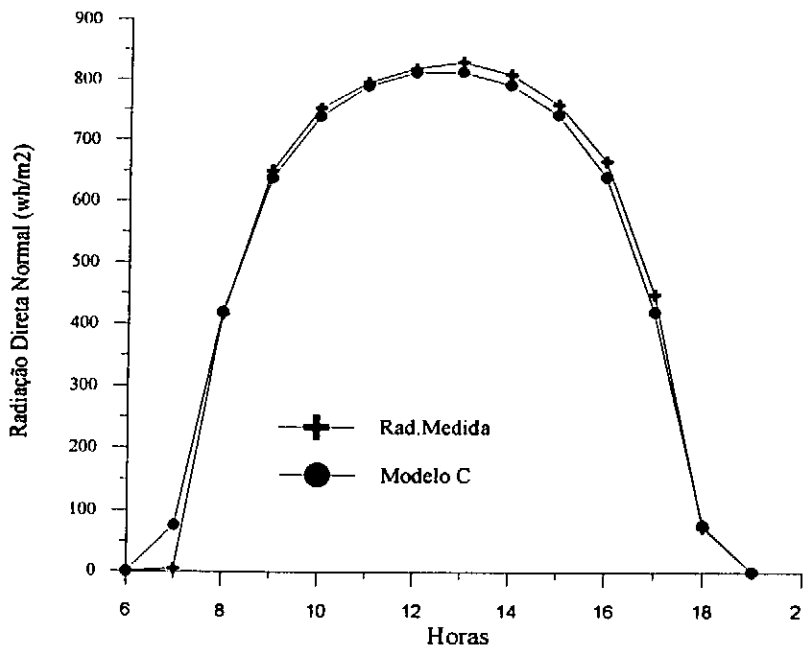


Figura 1b - Radiação Direta Medida e Estimada pelo Modelo C, em 7/6/92

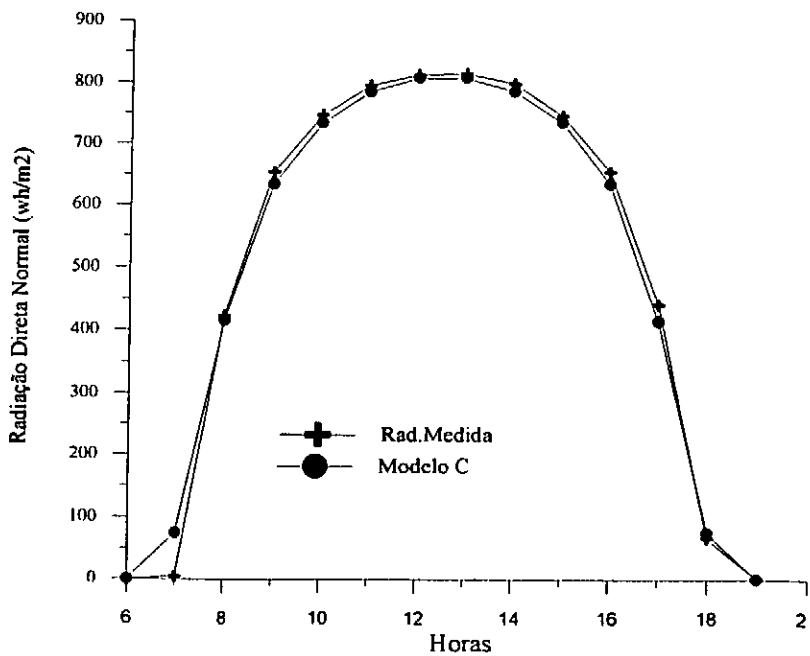


Figura 1c - Radiação Direta Medida e Estimada pelo Modelo C, em 9/6/92

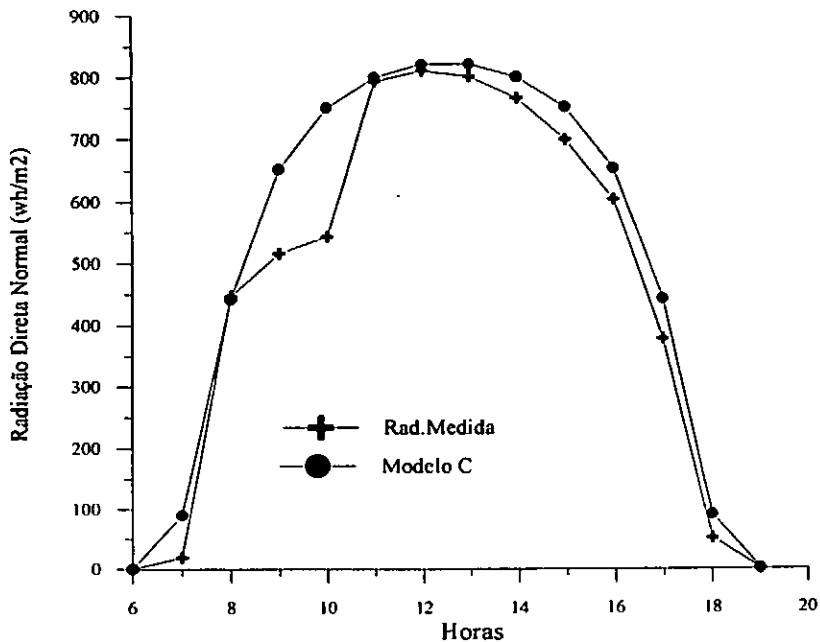


Figura 2a - Radiação Direta Medida e Estimada pelo Modelo C, em 23/5/92

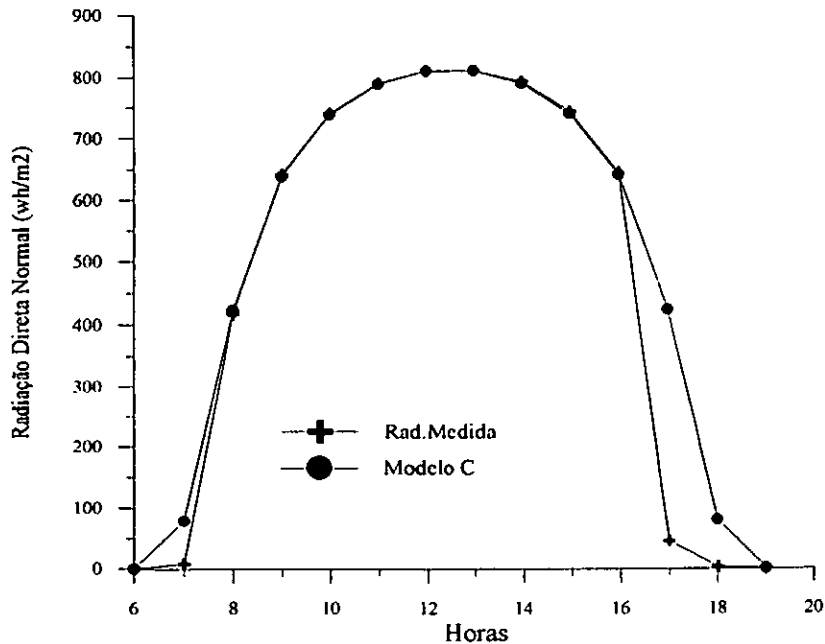


Figura 2b- Radiação Direta Medida e Estimada pelo Modelo C, em 02/6/92

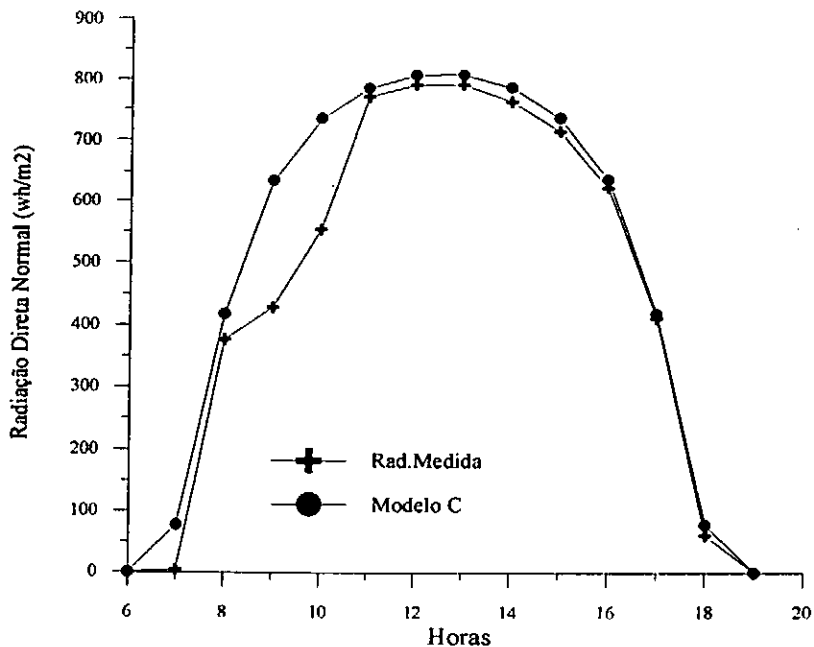


Figura 2c- Radiação Direta Medida e Estimada pelo Modelo C, em 05/6/92

No Período I, com exceção do dia 28/05, em que ocorreu uma leve atenuação da radiação por nebulosidade às 13 e 15 horas locais, o comportamento da radiação direta normal medida foi de dia completamente claro. Nesses dias observa-se que o modelo apresenta um bom desempenho quer a nível de total diário quer à nível de radiação horária.

No Período II, nos horários da ocorrência de nebulosidade mais acentuada, verificou-se que o modelo superestimou em muito os valores da radiação medida, fato também observado próximo ao nascer e por do sol. No dia 2/6 quando não houve nebulosidade até as 16 horas, o modelo mostrou ótimo desempenho.

A Tabela 3 apresenta os desvios horários entre a radiação medida e as estimadas pelo modelo, onde pode ser confirmada a adequação do modelo, com desvios durante os horários de maior insolação (de 8 às 17 horas), em geral, menores que 3% em módulo, à exceção dos horários em que houve nebulosidade quando os desvios foram maiores que 20%. Também foi verificado uma superestimativa da radiação direta normal durante todos os dias nos intervalos próximos ao nascer, onde os desvios variaram de 300% à 3000%, e por do sol (12% à 2900%). Estas discrepâncias são provavelmente devido a presença de montanhas no horizonte,

que impedem a incidência do raio direto no local de instalação do instrumental, quando a elevação do sol é muito pequena.

Tabela 3: Radiação Direta Normal Horária nos dias de céu claro e com alguma nebulosidade (Whm^{-2})

Dia	Hora	Rad.Direta Normal Horária			Dia	Hora	Rad.Direta Normal Horária		
		Medida	Modelo	Desvio			Medida	Modelo	Desvio
28/5	7	7.3	84.1	1052.2	23/5	7	19.0	89.5	371.2
	8	456.6	432.6	-5.2		8	447.2	441.7	-1.2
	9	669.9	645.8	-3.6		9	515.7	652.0	26.4
	10	762.8	745.1	-2.3		10	543.0	750.0	38.1
	11	811.3	794.9	-2.0		11	793.0	799.4	0.8
	12	823.4	816.0	-0.9		12	810.0	820.6	1.3
	13	815.8	816.0	0.0		13	800.7	820.8	2.5
	14	809.3	794.5	-1.8		14	765.5	800.0	4.5
	15	727.1	744.5	2.4		15	698.3	751.0	7.6
	16	670.4	645.4	-3.7		16	603.2	652.9	8.2
	17	465.8	432.6	-7.1		17	377.4	441.7	17.0
	17.6	74.5	84.0	12.7		17.6	50.4	89.7	78.0
07/6	7	4.5	76.0	1589.3	02/6	7	8.1	79.0	874.8
	8	416.3	419.0	0.7		8	417.8	422.9	1.2
	9	649.8	637.5	-1.9		9	641.5	638.3	-0.5
	10	751.8	738.9	-1.7		10	741.5	738.6	-0.4
	11	795.6	789.7	-0.7		11	790.8	788.8	-0.2
	12	818.3	811.7	-0.8		12	810.1	810.6	0.1
	13	828.8	811.9	-2.0		13	811.1	810.8	0.0
	14	807.8	790.3	-2.2		14	792.4	789.5	-0.4
	15	757.8	739.9	-2.4		15	743.3	739.5	-0.5
	16	664.0	638.6	-3.8		16	643.4	639.5	-0.6
	17	448.0	419.0	-6.5		17	45.2	422.9	835.6
	17.6	73.2	76.2	4.1		17.6	2.7	79.1	2830.5
09/6	7	3.8	74.5	1861.8	05/6	7	3.9	76.9	1871.3
	8	422.7	415.6	-1.7		8	376.3	418.1	11.1
	9	653.8	634.3	-3.0		9	428.8	634.0	47.9

	10	748.1	735.8	-1.7		10	553.1	734.4	32.8
	11	796.6	786.7	-1.2		11	770.2	784.6	1.9
	12	814.1	808.6	-0.7		12	789.9	806.3	2.1
	13	816.3	808.6	-0.9		13	789.7	806.5	2.1
	14	799.6	787.2	-1.6		14	762.5	785.2	3.0
	15	747.2	736.7	-1.4		15	713.8	735.3	3.0
	16	654.7	635.4	-3.0		16	622.2	635.1	2.1
	17	442.7	415.6	-6.1		17	410.7	418.1	1.8
	17.6	66.6	74.8	12.4		17.6	60.4	77.0	27.5

A Tabela 4 apresenta a contribuição percentual de cada hora para a radiação diária medida e estimada pelo modelo, assim como os desvios horários.

Tabela 4: Fração Horária da Radiação Direta e o Desvio Normalizado (%)

Dia	Hora	Rad. Direta Normal Horária			Dia	Hora	Rad. Direta Normal Horária		
		Medida	Modelo	Desvio			Medida	Modelo	Desvio
28/5	7	0.10	1.20	1.09	23/5	7	0.30	1.26	0.96
	8	6.44	6.15	-0.29		8	6.96	6.21	-0.75
	9	9.44	9.18	-0.26		9	8.03	9.17	1.14
	10	10.75	10.59	-0.16		10	8.45	10.55	2.10
	11	11.44	11.30	-0.14		11	12.35	11.24	-1.10
	12	11.61	11.60	-0.01		12	12.61	11.54	-1.07
	13	11.50	11.60	0.10		13	12.47	11.55	-0.92
	14	11.41	11.29	-0.12		14	11.92	11.25	-0.67
	15	10.25	10.58	0.33		15	10.87	10.56	-0.31
	16	9.45	9.17	-0.28		16	9.39	9.18	-0.21
	17	6.57	6.15	-0.42		17	5.88	6.21	0.34
	17.6	1.05	1.19	0.14		17.6	0.78	1.26	0.48
07/6	7	0.06	1.09	1.03	02/6	7	0.13	1.13	1.01
	8	5.93	6.03	0.10		8	6.48	6.08	-0.40
	9	9.26	9.17	-0.09		9	9.95	9.17	-0.78
	10	10.72	10.63	-0.08		10	11.50	10.61	-0.89
	11	11.34	11.36	0.02		11	12.26	11.33	-0.93
	12	11.66	11.68	0.02		12	12.56	11.65	-0.92

	13	11.81	11.68	-0.13		13	12.58	11.65	-0.93
	14	11.51	11.37	-0.14		14	12.29	11.34	-0.95
	15	10.80	10.65	-0.15		15	11.53	10.63	-0.90
	16	9.46	9.19	-0.27		16	9.98	9.19	-0.79
	17	6.39	6.03	-0.35		17	0.70	6.08	5.38
	17.6	1.04	1.10	0.05		17.6	0.04	1.14	1.10
09/6	7	0.05	1.08	1.02	05/6	7	0.06	1.11	1.05
	8	6.07	6.01	-0.06		8	5.99	6.05	0.06
	9	9.39	9.17	-0.21		9	6.83	9.17	2.35
	10	10.74	10.64	-0.10		10	8.81	10.63	1.82
	11	11.44	11.38	-0.06		11	12.26	11.35	-0.91
	12	11.69	11.70	0.01		12	12.58	11.67	-0.91
	13	11.72	11.70	-0.02		13	12.57	11.67	-0.90
	14	11.48	11.39	-0.09		14	12.14	11.36	-0.78
	15	10.73	10.66	-0.07		15	11.36	10.64	-0.72
	16	9.40	9.19	-0.21		16	9.91	9.19	-0.72
	17	6.35	6.01	-0.34		17	6.54	6.05	-0.49
	17.6	0.96	1.08	0.13		17.6	0.96	1.11	0.15

Observou-se que embora os valores próximos ao nascer e por do sol superestimassem a radiação (Tabela 3), sua contribuição para a radiação diária é somente da ordem de 1,5% e que a contribuição efetiva para o total diário de radiação se dá entre às 9 e 16 horas.

Analisando-se os valores percentuais do desvio em relação aos totais horários medidos, verifica-se que somente ocorrem valores maiores que 1% nos intervalos próximos ao nascer e por do sol e na ocorrência de nebulosidade.

As transmitâncias associadas aos diferentes constituintes atmosféricos foram analisadas sob dois aspectos. No primeiro, testou-se a sensibilidade das diferentes parametrizações às condições atmosféricas e no segundo analisou-se a contribuição de cada constituinte atmosférico para a extinção da radiação solar direta.

A fim de se identificar a influência do vapor d'água no cálculo da radiação direta, escolheu-se o dia 09/06 do Período I e o dia 23/05 do Período II, como sendo os dias em que os modelos tiveram o melhor e o pior desempenho entre todos os dias. Para que não houvesse a influência da posição do sol, utilizou-se os mesmos parâmetros astronômicos (δ e E_0) do dia

09/06 no dia 23/05. É pertinente mencionar que este tipo de análise não foi possível em relação a transmitância dos aerossóis, uma vez que a visibilidade foi mantida constante e igual a 30 km, correspondendo a dias de céu claro para o local.

A transmitância do vapor variou de 0.09% à 0.10% (Tabela 5), mostrando que a parametrização do vapor d'água tem pouca sensibilidade à mudanças da umidade. Estas variações nas transmitâncias do vapor estão correlacionadas à variações da ordem de 9,5% à 16,8% na água precipitável.

Tabela 5: Transmitância do vapor d'água

Hora	Dia 09/06	Dia 23/05	Dif.(%)
7	0.8919	0.8011	0.10
8	0.8375	0.8367	0.10
9	0.8555	0.8547	0.09
10	0.8646	0.8638	0.09
11	0.8696	0.8688	0.09
12	0.8718	0.8710	0.09

A sensibilidade da parametrização dos aerossóis à mudança da visibilidade, foi testada considerando-se os valores de 20 e 50 Km, que são os limites do intervalo transmitido no código Synop, para céu claro. A Tabela 6 mostra a variação percentual da radiação direta diária calculada em relação ao valor medido. Observa-se que dentro do intervalo de visibilidade adotado no código Synop para céu claro, há uma variação significativa da radiação calculada em relação à medida. O desvio variou de -9,3% à 8,1% sendo os melhores resultados situados próximos a distância visual de 30 Km.

Tabela 6: Discrepâncias entre a Radiação calculada e medida para diferentes visibilidades.

Visibilidade (km)	20	30	40
Desvio (%)	-9.3	-0.8	8.1

A figura 5 mostra as transmitâncias de cada constituinte atmosférico em função do ângulo zenital, para o dia 09/06/92. Observando-se estas figuras pode-se constatar que as transmitâncias diminuem com o aumento do ângulo zenital. Essa diminuição é bem acentuada para a transmitância devido a dispersão pelos aerossóis. O ozônio e os gases misturados são os

que apresentaram as transmitâncias mais altas, mais que 90%, logo os seus efeitos na transmitância total são mínimos. A transmitância Rayleigh e do vapor d'água variaram segundo o ângulo zenital entre 60 a 90%, aproximadamente. Por outro lado, a transmitância dos aerossóis abrangeu valores da ordem de 10 a 90%. Embora essa faixa seja bastante ampla, a transmitância dos aerossóis no período de maior incidência solar, ângulos zenitais menores que 60°, é superior a 70%. Esta observação também é válida para a transmitância Rayleigh e do vapor, cujos valores nesse período ultrapassaram a 80%.

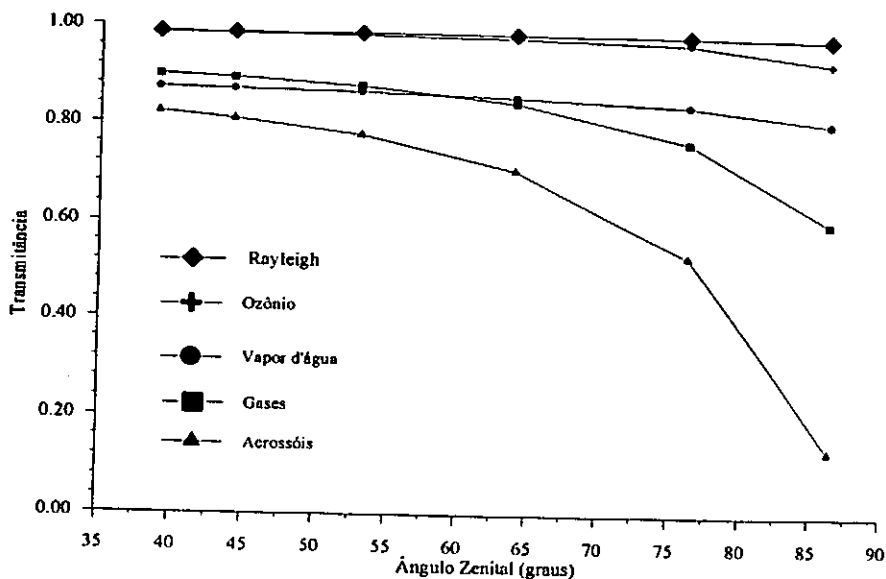


Figura 5 - Transmitâncias dos constituintes atmosféricos em função do ângulo zenital

4. CONCLUSÃO

O modelo em hipótese alguma considera a presença de nuvens, como pode ser observado nos dias que correspondem ao Período II.

O critério de seleção de dias claros com base nas observações das 12 e 18 TMG não eliminaram a possibilidade de ocorrência de nuvens isoladas nos horários intermediários, o que pode conduzir a interpretações errôneas na performance do modelo.

Para dias totalmente claros (Período I) o modelo apresentou resultados com acurácia da ordem de 4% (período entre 9 e 16 horas) e 1% a nível de total diário.

A parametrização dos aerossóis, do vapor d'água e de Rayleigh foram as que mais influenciaram as estimativas da radiação direta, enquanto os efeitos das parametrizações do ozônio e dos gases misturados foram mínimos (transmitâncias maiores que 90%).

As variações das transmitâncias da radiação solar direta devido ao vapor d'água não apresentaram variações relevantes quando a quantidade de vapor aumentou de 9,5 a 16,8 %.

A transmitância devido aos aerossóis diminuiu com a redução da visibilidade, o que era esperado, uma vez que a diminuição da visibilidade está associada ao aumento da quantidade de aerossóis na atmosfera..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIRD, R.E.; HULSTROM, R.L. Direct Insolation Models. Solar Energy Research Institute, Colorado, SERI-TR-335-344, 1980.
- BIRD, R.E.; HULSTROM, R.L. A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. Solar Energy Research Institute, Colorado, SERI-TR-642-761, 1981.
- BRINE, D.T.; IQBAL, M. Diffuse and Global Solar Spectral irradiance under cloudless skies. Solar Energy, USA, Vol.30(5):447-453, 1983.
- FROHLICH, C.; BRUSA, R.W. Solar Radiation and its Variation in Time. Solar Phys., Vol.74:209-251, 1981.
- GUEYMARD, C. A Two-band Model for the Calculation of Clear Sky Solar Irradiance, Illuminance and Photosynthetically Active Radiation at the Earth's Surface. Solar Energy, USA, Vol.43(5):253-265, 1989.
- HASTENRATH, S. Climate and Circulation of the Tropics. D.Reidel Publishing Company, Holland, 1988.
- HATFIELD, J.L.; GIOGIS, R.B.; FLOCCHINI, R.G. A Simple Solar Radiation Model for Computing Direct and Diffuse Spectral Fluxes. Solar Energy, USA, Vol.27(4):323-329, 1981.
- IQBAL, M. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, NY, 1983.
- IRIBARNE, J.V.; GODSON, W.L. Atmospheric Thermodynamics. D.Reidel Publishing Company, Holland, pp.450, 1981.
- KASTEN, F. A. A New Table and Approximate Formula for Relative optical Air Mass. Arch.Meteorol.Geophys.Bioklimatol., Germany, Serie B 14: 206-223, 1966.
- LECKNER, B. The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface- Elements of a Model. Solar Energy, USA, Vol.20:143-150, 1978.
- MACHLER, M. Parameterization of Solar Radiation under Clear Skie. University of British Columbia, Canada, M.A.Sc. Thesis, 1983.
- MAXWELL, E.L. A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation. Solar Energy, Research Institute, Colorado, SERI-TR-215-3087, 1987.
- MORIATY, W.W. Estimation of Solar Radiation from Australian Meteorological observations. Solar Energy, USA, Vol.47(3):209-218, 1991.

- RIZZI, R.; SERIO, C.; GUZZI, R.; FRANCESCA, M. Solar Direct Irradiance at the Ground: A Parametric Approach. Solar Energy, USA, Vol.25:15- 20,1980.
- ROBINSON, N. Solar Radiation. American Elsevier, USA, 1966.
- SELBY, J.E.A.; KNEIZYS, F.Y.; CHETWIND JR.,J.H.; McCLATCHEY, R.A. Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code Lowtran 4. Air Force Cambridge Research Labs., Cambridge, AFGL-TR-78-0053, 1978.
- SELBY, J.E.A.; McCLATCHEY, R.A. Atmospheric Transmittance from 0,25 to 28,5 μm : Computer Code Lowtran 3. Air Force Cambridge Research Labs., Cambridge, AFGL-TR-75-0255, AD-A017734, 1975.
- SHERRY, J.E.; JUSTUS, C.G. A Simple Hourly Clear-Sky Solar Radiation Models based on Meteorological Parameters. Solar Energy, USA, Vol.30(5): 425-431,1983.
- SOLMET. National Climatic Center, North Carolina, User's Manual Report TD-9724, Vol.1, 1978.
- SPENCER, J.W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. Search, USA, Vol.2(5), pp.172, 1971.
- STEWART, R. Atmospheric Sciences Research Center, Albany, Personal Communication, 1988.
- VIANELLO, L.R.; ALVES, A.R. Meteorologia Básica e Aplicações. Imprensa Universitária, Viçosa, pp.449, 1991.