

ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES MODELOS PARAMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA DIRETA NA INCIDÊNCIA NORMAL (DNI) EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

C. M. Santos^{1a}, J. F. Escobedo^{2b}, C. O. Carvalho^{3a}, M. B. P. Silva^{4b}, J. M. S. Ferrari^{5b}.

^aFaculdade de Engenharia Agrônômica – UFPA, Altamira, PA, Brasil, e-mail: ciceromanoel2007@gmail.com

^bFaculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP.

Recibido 10/08/18, aceptado 24/09/18

Resumo: A modelagem da irradiância direta na incidência normal (DNI) na condição de céu claro é importante para diferentes aplicações solarimétricas. Neste estudo, é apresentada uma revisão de 12 modelos de transferência radiativa. Esses modelos são usados para estimar a DNI em dia de céu claro na partição horária na região de Botucatu/SP/Brasil. Os modelos revisados são categorizados em duas classes: modelos simples e complexos. Foram utilizados MBE, RMSE e MAPE para avaliar o desempenho dos modelos. Os modelos que exigem mais entradas atmosféricas (modelos complexos) tiveram um desempenho melhor do que os modelos mais simples. A estimativa de DNI com os modelos mais simples é menos preciso e apresenta erros maiores. Apesar de limitações consistentes no uso de parâmetros estimados, o desempenho dos modelos pode ser considerado satisfatório com base na métrica dos índices estatísticos. Os melhores desempenhos são destacados para os modelos #10 (MRM5) e #12 (Yang).

Palavras-chave: Irradiância solar, Céu claro, Transferência radiativa, Validação.

INTRODUÇÃO

O conhecimento de DNI, por meio de séries temporais ou modelos de estimativa, é importante em muitas áreas científicas e tecnológicas. Na engenharia é destaque na geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos, nos processos de conversão térmica por intermédio de sistemas solares concentrados, no aquecimento e iluminação natural de ambientes. Os dados de DNI podem ser utilizados para monitorar tendências de turbidez atmosféricas e poluição durante longos períodos de tempo (Gueymard, 2003a). O estudo da variabilidade e disponibilidade de DNI numa determinada região pode ser feita através de séries temporais ou com uso de modelos de estimativa.

Séries temporais e espaciais são resultados de medidas no tempo e espaço, e permitem conhecer a disponibilidade solar diurna, sazonal e anual em função do tempo e do espaço. No entanto, sua obtenção exige que as medidas de DNI sejam realizadas rotineiramente por longos anos através de sensores solares. Na ausência de medidas confiáveis e na indisponibilidade de uma série contínua, modelos de estimativa têm sido utilizados com grande frequência para gerar dados de DNI, os modelos para a DNI são separados em estatísticos e paramétricos (Madkour et al., 2006). Os modelos paramétricos exigem entrada mista de

¹Professor da Faculdade de Engenharia Agrônômica - UFPA.

²Professor da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP.

³Graduanda em Engenharia Agrônômica – UFPA.

⁴Eng. Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem.

⁵Mestranda em Irrigação e Drenagem.

parâmetros meteorológicos, tais como concentrações de aerossóis, vapor de água, ozônio, nuvens, gases, massa óptica e fator de turbidez. São classificados em diferentes classes, de acordo com as variáveis de entrada (Gueymard e Ruiz-Arias, 2015).

Alguns modelos parametrizados (transferência radiativa) são mais complexos e precisos, pois levam em consideração informações detalhadas das condições atmosféricas - variáveis frequentemente utilizadas como indicadores do tipo, quantidade e distribuição de nuvens, ou outras observações (radiação solar fracionada, turbidez atmosférica, vapor de água, concentração de ozônio, aerossóis e quantidade de água precipitável) (Gueymard e Ruiz-Arias, 2015).

Os modelos paramétricos, fundamentados em princípios físicos de transferência radiativa, estão relacionados aos processos de absorção e espalhamento do feixe solar quando atravessa a atmosfera terrestre. Estes levam em consideração a interação com os processos de atenuação: espalhamento Rayleigh (T_R), absorção pelo ozônio (T_o), absorção por gases (T_g), absorção pelo vapor d'água (T_w) e atenuação pelo aerossol (T_A). A atenuação na atmosfera é inteiramente dependente da água precipitável, pressão atmosférica, massa óptica do ar e dos parâmetros de turbidez atmosférica de Ångström (β e α) (Gueymard, 2003b).

Diante disto, o trabalho tem como objetivo avaliar doze modelos paramétricos para estimativa da irradiância direta na incidência normal (DNI) em Botucatu. Os modelos foram selecionados de acordo com os parâmetros de entradas, a disponibilidade de dados no local e a menor complexidade com relação a outros modelos existentes na literatura. A avaliação dos modelos permitirá estimar a DNI em função dos constituintes atmosféricos, através dos princípios de espalhamento e absorção equacionados em modelos matemáticos. Há pouquíssimas informações disponíveis na literatura sobre a utilização de modelos parametrizados na estimativa de DNI no Estado de São Paulo, e em particular, Botucatu. Os resultados serão de grande importância para avanços solarimétricos na região.

MATERIAL E MÉTODOS

Local e Instrumentação.

Os dados utilizados foram da cidade de Botucatu, localizada no Estado de São Paulo – Brasil. Botucatu é a sexta mais populosa cidade da região Centro-Oeste Paulista e possui área total de 1.483 m^2 . A Estação de Radiometria solar está instalada na Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP (latitude 22.85°S; longitude 48.45°W e altitude 786m). A Figura 1 ilustra a localização de Botucatu e da estação radiométrica. Botucatu é a única cidade da região Centro-Oeste Paulista que possui medidas simultâneas de irradiação Global, Direta e Difusa a longo prazo.

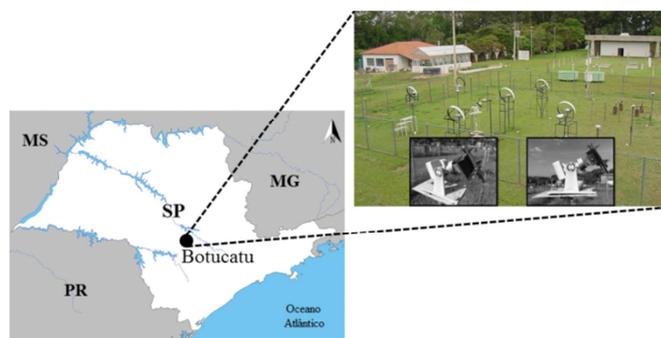


Figura 1: Localização da estação radiométrica.

Com bioma de cerrado e mata atlântica, Botucatu possui clima temperado quente (mesotérmico), verão quente e úmido com elevada precipitação e inverno seco (Escobedo et al., 2011). Com base numa série climática de 38 anos (1971 a 2009), a precipitação média anual acumulada é de 1.494,10 mm, com chuvas mensais entre 40.12±41.76 mm (junho) e 270.49±110.36 mm (janeiro). A umidade relativa do ar varia de 62.61±8.88% (agosto) a 76.26±8.24% (fevereiro), com média anual de 69.93±4.44%. A temperatura do ar varia de 23.21±1.20°C em fevereiro a 17.16±1.33°C em julho e temperatura do ar

média anual de $20.46 \pm 2.21^\circ\text{C}$. O período mais chuvoso ocorre de outubro a março (primavera-verão) e o menos chuvoso entre abril e setembro (outono e inverno).

Para uma modelagem mais precisa, o uso de uma longa série climática é de grande importância na área solar. Neste estudo, serão utilizados dados de irradiância direta na incidência normal (DNI, W/m^2), período de 1996 a dezembro de 2008. A DNI foi monitorada por pireliômetro da Eppley NIP acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. O erro de medição de DNI está relacionado com a precisão do equipamento Eppley. Para aquisição de dados, foi utilizado um registrador de dados Campbell Scientific CR23X com uma frequência de amostragem de 1 Hz. Os quais foram coletados a cada 1 segundo e foram armazenadas médias a cada 5 min, que posteriormente, foram utilizados para obtenção das médias horárias.

Modelos paramétricos (transferência radiativa).

Muitas aplicações de energia solar requerem uma avaliação da entrada de DNI para sistemas de energia solar a partir de dados meteorológicos. Dados de céu sem nuvens são particularmente importantes porque correspondem à potência máxima de sistemas solares, necessários para a concepção e dimensionamento de sistemas solares (Gueymard, 2008).

Os modelos de transferência radiativos são potencialmente capazes de preverem com elevada precisão valores compatíveis com dados medidos de DNI, sendo parametrizados e baseados na física da interação entre a irradiância solar e os constituintes atmosféricos (Gueymard, 2003b). Estes modelos sempre dependem do ângulo solar zenital, Z , e de um número limitado de outros fatores, tipicamente até oito, cujo papel é o de descrever as condições atmosféricas. Outros modelos tomam a geometria solar em consideração através da massa relativa do ar (m_r) em vez de Z . Os modelos mostram que, na condição de céu limpo, DNI é afetado principalmente pela Profundidade Óptica do Aerossol (AOD), e em segundo lugar pela água precipitável (w). Os modelos que serão avaliados aqui foram selecionados a partir de diferentes fontes (Gueymard, 2003a; Gueymard, 2012; Gueymard e Ruiz-Arias, 2015). A seleção dos modelos foi pela necessidade de indicar os modelos com maior potencial de estimativa de DNI na região de Botucatu para aplicações solarimétricas, levando em consideração os parâmetros de entrada, a disponibilidade de dados no local e a menor complexidade com relação a outros modelos existentes na literatura. Além disso, neste estudo limitamos a avaliação destes modelos por considerarmos que são mais frequentemente citados na literatura. A lista completa do conjunto dos modelos selecionados é mostrada na Tabela 1, juntamente com as entradas que eles dependem, bem como os autores que propuseram.

Código	Modelo	Publicação	Entradas
#1	Majumdar	Majumdar (1972)	p, w
#2	Allen	Allen (1996)	p, w
#3	Ghouard	Saïghi (2002)	descrito no texto
#4	Perrin I	Mghouchi et al. (2016)	descrito no texto
#5	HLJ	Hottel (1976)	descrito no texto
#6	Fu	Fu e Rich (1999)	descrito no texto
#7	Heliosat-1	Dumortier (1995)	TL
#8	Bird	Bird e Hulstrom (1980)	p, w, l, β, α
#9	Iqbal - C	Iqbal (1983)	p, w, l, β, α
#10	MRM5	Kambezis e Psiloglou (2008)	p, w, l, β
#11	Perrin II	Perrin de Brichambaut e Vauge, (1982)	p, w, l, β
#12	Yang	Yang et al. (2001)	p, w, l, β

Tabela 1: Informações gerais sobre os modelos de radiação.

Os modelos indicados que não tem entrada dependem dos seguintes fatores: modelo #3 (baseiam nas avaliações dos fatores perturbadores dependendo das condições atmosféricas e parâmetros astronômicos), modelo #4 (parâmetros astronômicos), modelo #5 (parâmetros astronômicos e elevação) e modelo #6 (altitude do local e do ângulo zenital solar). Embora alguns modelos tenham sido propostos utilizando constante solar definida na época, neste estudo o valor será padronizado (fixado em 1367.0 Wm^{-2}). As possíveis entradas atmosféricas são: pressão atmosférica da estação, p

(ou, para resultados equivalentes na prática, elevação da estação), água precipitável total (w), quantidade total de ozônio (l), fator de turbidez de Linke (TL), AOD, coeficiente de turbidez Ångström (β) e expoente de Ångström (α). Todos os modelos usam o ângulo zenital solar, Z , direta ou indiretamente através do cálculo de m_r , além dos fatores astronômicos. Convém destacar que os modelos de #1 a #6 são classificados com modelos simples. O modelo #7 é simples e baseado na turbidez de Linke. Os modelos de #8 a #12 são caracterizados por serem complexos. Essa classificação é considerada a partir da quantidade de parâmetros de entrada exigida por cada modelo e a eficiência em estimar DNI.

Os modelos de Majumdar (#1) (eq. 1) e Allen (#2) (eq. 2) foram originalmente desenvolvidos para condições de "baixa turbidez atmosférica", ou seja, condição de céu claro:

$$DNI = 0.955 \cdot E_{on} \left[0.8644 \left(\frac{p - m_a}{1000} \right) \times 0.8507^{(m_a w) \cdot 0.25} \right] \quad (1)$$

$$DNI = 0.98 \cdot E_{on} \cdot \exp \left[-\frac{0.00146p}{(k \cos Z)} - 0.075 \left(\frac{w}{\cos Z} \right)^{0.4} \right] \quad (2)$$

onde, m_a é aqui assumido como sendo obtido a partir de Z pela equação de Kasten, p é a pressão na superfície, w é a quantidade de vapor de água em um caminho vertical e k é um "coeficiente empírico de turbidez". Como não existe nenhum método prático para relacioná-lo com medições de turbidez reais. O valor padrão $k = 1$ (de "céu limpo") será usado em todos os momentos no presente caso. O modelo de Ghouard (#3) (eq. 3) estima DNI não levando em conta o fluxo solar absorvido e refletido pelos componentes atmosféricos:

$$DNI = E_{sc} E_o A_1 \exp \left(-\frac{A_2}{\sin(h)} \right) \sin(h) \quad (3)$$

sendo E_o a excentricidade da órbita da terra, E_{sc} é a constante solar, A_1 e A_2 são os coeficientes do fator de turbidez para condição de céu em condições normais tabelados. A elevação solar (h , graus) é o ângulo entre o plano horizontal com a direção do Sol, varia entre 90° (zênite) e -90° (nadir). Em 1975, Perrin Brichambaut propôs um modelo (#4) (eq. 4) que é uma função dos parâmetros astronômicos:

$$DNI = R \cdot \exp \left(-\frac{A_2}{B \sin(h + 1)} \right) \quad (4)$$

onde R (W/m^2) é a irradiância extraterrestre aparente, A e B (adimensional) são valores empíricos para calcular a irradiância solar. O modelo de Hottel (#5) (eq. 5) resulta da combinação popular de modelo banda larga para transmissão direta. A formulação de Hottel para uma visibilidade de 23 km é convencionalmente usado na literatura e será utilizada também aqui:

$$DNI = E_{on} \left[a_0 + a_1 \exp \left(-\frac{a_2}{\cos Z} \right) \right] \quad (5)$$

onde os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 dependem da elevação. O modelo de Fu e Rich (#6) (eq. 6) simples desenvolvido especificamente para aplicações de GIS é a base do analista de energia solar, um componente da rotina Spatial Analyst, parte do software ArcGIS da ESRI:

$$DNI = E_{on} \times T_b^{m_f} \quad (6)$$

onde a T_b é uma transmitância atmosférica em massa, com um valor recomendado de 0,5, e m_f é a massa de ar corrigido pela altitude. A parte de céu limpo do modelo Heliosat-1 (#7) (eq. 7) é composto por uma combinação de algoritmos separados para irradiação direta e irradiação difusa. Uma vez que estes documentos não são facilmente disponíveis, as principais equações são fornecidas:

$$DNI = E_{on} \times \exp(-m_r \times \sigma \times T_L) \quad (7)$$

onde T_L é a turbidez atmosférica de Linke, σ é calculado e m_r . A estrutura base dos modelos complexos segue o modelo original de Bird e Hulstrom (1980), que desenvolveram um modelo paramétrico para estimar a DNI para condições de céu claro, em função da absorção e transmissão pelos componentes atmosféricos, tais como o ozônio, gases, vapor d'água e aerossóis:

$$DNI = 0.9662 \cdot E_o \cdot E_{sc} \cdot T_R \cdot T_o \cdot T_g \cdot T_w \cdot T_a \quad (8)$$

Sendo: (T_R) transmitância devido à dispersão de Rayleigh, (T_o) a transmitância devido ao ozônio, (T_g) a transmitância devido aos gases, (T_w) absorção devido ao vapor d'água e (T_a) a transmitância devido ao aerossol. Todas as transmitâncias são adimensionais. T_R e T_a são transmissões devido a espalhamento de Rayleigh e Mie, T_g , T_o e T_w as transmissões devido aos gases mistos, à dispersão de ozônio e vapor de água, respectivamente. O fator 0.9662 está incluído de acordo com o intervalo espectral considerada ser 0.3 – 3 μm . E_o (sem dimensão) é o fator de correção da excentricidade da órbita da Terra:

$$E_o = 0.0011 + 0.34221 \times \cos \Gamma + 0.0128 \times \sin \Gamma + 0.00719 \times \cos 2\Gamma + 0.00077 \times \sin 2\Gamma \quad (9)$$

Onde o ângulo do dia (Γ , em radianos) é dado por:

$$\Gamma = 2\pi \times \left(\frac{Dj-1}{365} \right) \quad (10)$$

DJ é o dia Juliano, sendo 1 para o 1 de janeiro e 365 para o dia 31 de dezembro. E_{sc} é a constante solar (1367.0 Wm^{-2}). As transmitâncias são expressas matematicamente como:

$$T_R = \exp \left[-0.0903 \times (m_r)^{0.84} \times (1.0 + m_r - (m_r)^{1.01}) \right] \quad (11)$$

$$T_o = 1.0 - \left[0.1611 \times U_3 \times (1.0 + 139.48 \times U_3)^{-0.3035} - 0.002715 \times U_3 \times (1.0 + 0.044 \times U_3 + 0.0003 \times U_3^2)^{-1} \right] \quad (12)$$

$$T_g = \exp \left[-0.0127 \times (m_r)^{0.26} \right] \quad (13)$$

$$T_w = 1 - \left\{ 2.4959 \times U_1 \times \left[(1.0 + 79.034 \times U_1)^{0.6828} + (6.385 \times U_1) \right]^{-1} \right\} \quad (14)$$

$$T_a = \exp \left[-K_a^{0.873} \times (1.0 + K_a - K_a^{0.7088} \times (m_a)^{0.9108}) \right] \quad (15)$$

Onde: m_a (adimensional) é a massa de ar a pressão real, m_r (adimensional) é a massa de ar à pressão normal (1013.25 mbar), U_1 (cm) é o comprimento óptico parente corrigido da água precipitável, K_a (dimensão) é a espessura óptica aerossol e U_3 (cm) é comprimento da profundidade óptica relativa do ozônio sob condições normais de temperatura e pressão. Eles são calculados por:

$$m_a = \frac{1}{\sin(h) + \left\{ 9.4 \times 10^{-4} \times [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253} \right\}} \quad (16)$$

$$m_r = m_a \times \left(\frac{P}{1013.25} \right) \quad (17)$$

$$U_1 = w \times m_a \quad (18)$$

$$U_3 = l_{oz} \times m_a \quad (19)$$

$$K_a = 0.2758 \times K_{a\lambda_1} + 0.35 \times K_{a\lambda_2} \quad (20)$$

Porque estas profundidades ópticas espectrais geralmente não são conhecidas, (Eq. 20), foi modificada aqui através da utilização da lei de Ångström:

$$K_{a\lambda} = \beta_A \times \lambda^{-1.3} \quad (21)$$

Onde: $\lambda_1 = 0.38 \mu\text{m}$ e $\lambda_2 = 0.50 \mu\text{m}$. λ (μm) é o comprimento de onda, β_A e α_A são os coeficientes de turbidez de Ångström (Tabela 2). Para o único valor do expoente de comprimento de onda considerado, teremos:

$$K_a = 1.832 \times \beta_A \quad (22)$$

Zonas climáticas	β_A	α_A
Zona rural	0.05	0.11
Zona urbana	0.10	0.22
Zona industrial	0.30	0.66

Tabela 2: Coeficiente de turbidez de Ångström.

p (mbar) é a pressão do ar local, z (m) é a altitude do local, l_{oz} é a espessura (em cm) da quantidade total de ozônio na direção vertical reduzida à pressão padrão e w (cm) é a espessura de vapor de água

precipitável reduzida para a pressão normal e a temperatura (T) de 273 K, é calculado com a espessura de vapor de água precipitável sob a condição real (w_0) (cm). Todos estes são obtidos por:

$$p = 1013 \times (1 - 2.257 \times 10^{-5} \times z)^{5.26} \quad (23)$$

$$l_{oz} = \frac{1}{9.4 + 0.9 \times m_a} \quad (24)$$

$$w = w_0 \times \left(\frac{p}{1013.25} \right)^{\frac{3}{4}} \times \left(\frac{273}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$$T = 288 - 6.5 \times 10^{-3} \times z \quad (26)$$

Os modelos complexos demandam de parâmetros de entrada. Na ausência de medidas de alta qualidade na região de interesse, utiliza-se a estimativa desses parâmetros. Na região de Botucatu medidas de alta qualidade não estão disponíveis, por isso os parâmetros foram estimados utilizando a metodologia descrita nas equações (1 – 19) (Mghouchi et al., 2016). Esta metodologia para o modelo #8 (Bird e Hulstrom, 1980), quando necessário, também foi utilizada para o cálculo dos parâmetros dos outros modelos paramétricos (#9 a #12). Maiores detalhes das equações dos modelos (#4 - #7 e #9 - #12) são encontradas (Gueymard, 2003a; Gueymard, 2012; Gueymard e Ruiz-Arias, 2015).

Indicativos Estatísticos.

Os indicativos estatísticos Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE) e Mean Absolute Percentage Error (MAPE) foram empregados na avaliação do desempenho dos modelos. MBE, RMSE e MAPE são expressos em porcentagem da média da medida. As definições detalhadas destes índices e as equações são encontradas Gueymard, (2014).

RESULTADOS

Comparação e validação dos modelos paramétricos.

Os modelos foram avaliados levando em consideração à base total de dados. Foram consideradas medidas somente na condição de céu claro. O número total de medições foi de 20.311 horas, correspondente ao período de fevereiro de 1996 a dezembro de 2008. Os critérios adotados na seleção dos dados para a aplicação nos modelos foram baseados em Karayel et al. (1984), onde a DNI deve ser maior que 200 Wm^{-2} e a razão entre a irradiação difusa pela global menor que 1/3. Além disso, foi considerado que a transmissividade atmosférica (K_t) da irradiação solar global (H_g) não pode ser menor que a 0.675. Os parâmetros de entradas utilizados foram na mesma partição de tempo da modelagem, valores horários. Os valores de MBE são mostrados na Figura 2a, como era de se esperar, os modelos que usam mais parâmetros atmosféricos tem um desempenho geralmente melhor e mais consistente do que aqueles que usam poucas ou nenhuma dessas entradas. Os resultados mostram que os modelos #1 a #5 e #12 superestimaram as medidas, enquanto que os demais subestimaram. A maior superestimava é observada para o modelo #2 e a maior subestimativa para #6, com valores de MBE entre -25% e 25%. Os menores valores de MBE são observados para os modelos mais complexos, com destaque para os modelos #10 (MRM5) e #12 (Yang) com valores iguais a -0.16 e 0.36%, respectivamente. O modelo #7, considerado mais simples e baseado na turbidez de Linke, subestimou as medidas próximo de zero (MBE = -1.20 %).

No geral, a maioria dos modelos mostram valores absolutos de MBE menores que 10%. O desempenho inferior dos modelos mais simples, considerando a base total, está condicionado aos parâmetros utilizados como entrada. Além disso, o desempenho dos modelos mais complexos pode ter sido afetado pelo uso na entrada de parâmetros estimados, devido à indisponibilidade de medidas na região de Botucatu. É sabido que a avaliação de DNI de céu claro é feito com maior precisão se os instrumentos de medidas forneceram os parâmetros de entrada na mais alta resolução possível. Polo e Estalayo (2015) destacam que outras fontes de aerossóis que existem e está mais prontamente disponível em escala global, a qualidade é inferior e resulta em estimativas de DNI substancialmente distorcidas.

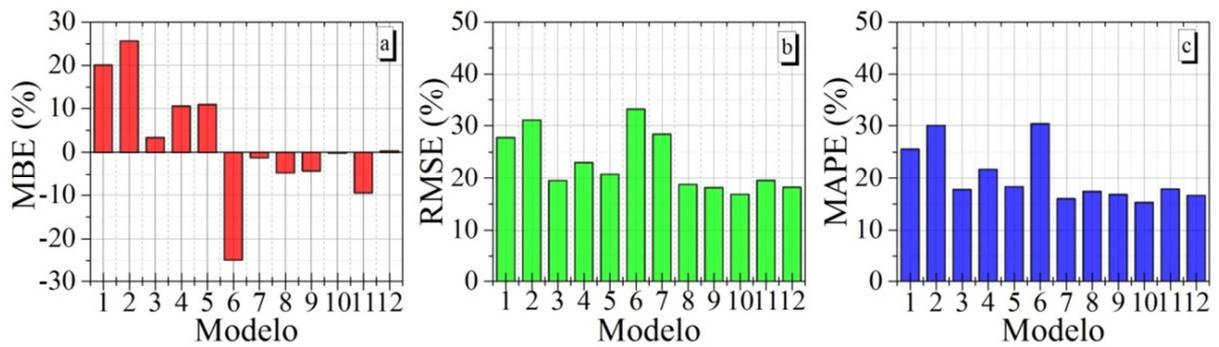


Figura 2: Índices estatísticos para DNI prevista por 12 modelos. a) MBE (em porcentagem), b) RMSE (em porcentagem) e c) MAPE (em porcentagem).

A Figura 2b resume o índice RMSE de comparação entre os valores de DNI medidos e estimados pelos doze modelos. Os resultados mostram que os modelos mais simples tiveram maiores dispersão, com destaque negativo para os modelos #1 (RMSE = 27.78%), #2 (RMSE = 31.11%), #6 (RMSE = 33.18%) e #7 (RMSE = 28.46%). Com exceção do modelo #7, os valores de RMSE estão de acordo com os índices de MBE dos mesmos modelos. Os maiores erros podem ser explicados pelo modo simplista utilizado na maioria destes modelos que descrevem a física dos processos de transferência radiativa.

Embora os resultados mostrem incertezas nas estimativas de DNI, os modelos mais complexos responderam bem aos parâmetros de entrada estimados, mas as estimativas de DNI foram sensíveis aos parâmetros de entrada. Apesar das dificuldades em prever DNI considerando as estimativas dos parâmetros de entrada e a dinâmica atmosférica, os modelos demonstram precisões satisfatórias. Nos dias atuais existem vários modelos para prever DNI com alta precisão nas condições de céu limpo, enquanto que a simulação para condição de céu nublado incluem altas incertezas devido a vários desafios na parametrização das propriedades ópticas das nuvens e na interação com aerossóis atmosféricos. Erros no AOD resultam em necessariamente em erros no DNI estimado. Pode-se argumentar que os valores de RMSE são geralmente grandes, mas ainda correspondem a erros absolutos relativamente pequenos, uma vez que o DNI foi estimado utilizando parâmetros estimados, mas em qualquer caso há espaço para melhorias na modelagem.

Os valores de MAPE para os modelos são mostrados na Figura 2c. O maior valor de MAPE (= 30.4 %) é observado para o modelo #6 e o menor (MAPE = 15.28 %) para o modelo #10. Os modelos mais simples apresentam MAPE maiores que dos modelos mais complexos, como é observado para #1 (MAPE = 25.6%), #2 (MAPE = 30.07 %) e #4 (MAPE = 21.82%). O valor de MAPE (16.04%) do modelo #7 tem a mesma tendência dos demais índices estatísticos, gerando erros semelhantes aos modelos mais complexos. Os modelos considerados mais complexos apresentam valores de MAPE menores que 20%. Os modelos mais simples resultaram em média MAPE = 22.86±5.92% e os mais complexos MAPE = 16.81±0.98%, que representa uma diferença de 26.47%. Levando em consideração que os parâmetros de entrada foram estimados, estes resultados podem ser considerados satisfatórios. Inconsistências ou erros são inerentes às diferenças nas funções de transmissão de cada modelo, assim como, podem ser atribuídos nas estimativas dos parâmetros de entradas. Os erros nos parâmetros de entrada podem se propagar e afetar consideravelmente as estimativas de DNI. Gueymard (2004) destacou que erros na estimativa de DNI podem ser atribuídos ao erro na determinação nos valores de w e β nas diferentes posições solares.

Os modelos com piores desempenhos estatísticos, não significam necessariamente que não se aplicam corretamente a atmosfera de Botucatu. É provável que os modelos que resultam em uma grande diferença entre as medidas e estimativas foram desenvolvidos para estimar DNI em determinados locais. Podemos destacar que os modelos #10 e #12 estimaram com um pouco mais de consistência que os demais modelos, oferecendo informações mais precisas sobre o DNI do que os demais modelos mais sofisticados e modelos simples. Em relação ao modelo de Yang (#12), os presentes resultados confirmam as investigações de Gueymard (2012), no sentido de que suas estimativas de DNI eram razoavelmente boas e discorda dos resultados de Younes e Muneer (2007). Destacamos que mais

validações são necessárias para avaliar melhor o seu desempenho. Principalmente, utilizando parâmetros com medidas locais e de alta qualidade. O modelo simples #3 também se saiu surpreendentemente melhor que alguns modelos bem conhecidos para o mapeamento de recursos solares. Além disso, considerando os valores dos índices estatísticos, o modelo #7 baseado no coeficiente de turbidez de Linke teve desempenho superior a alguns modelos mais sofisticados. Isso corrobora os resultados achados em Gueymard (2005) e também em Gueymard e Ruiz-Arias (2015) e confirma que a turbidez é uma entrada essencial para obter uma precisão razoável nas previsões de DNI. Os modelos mais sofisticados podem prever DNI com incerteza aceitável, no entanto, isso só pode ser alcançado se forem fornecidos dados de entrada de alta qualidade e alta frequência (Gueymard, 2012).

Variação de DNI e transmitância total em função de m_r e ES.

O produto das transmitâncias ($T_R \cdot T_o \cdot T_g \cdot T_w \cdot T_a$), obtidos pelos modelos #8 a #12 denominamos de transmitância total (τ_{total}). Estamos considerando que o modelo #11 também possui uma transmitância total, apesar de possuir um equacionamento diferente. A curva de correlação entre a transmitância total e a massa relativa de ar (obtida pela equação 17) é a mostrada na Figura 3a e a curva da correlação entre a transmitância total e a elevação solar na Figura 3b. As curvas foram elaboradas para observar o comportamento de τ_{total} em função desses parâmetros na atmosfera de Botucatu. Ao fazer a correlação, as curvas exponenciais confirmam a Lei de Beer para os modelos #8 a #12. Observa-se que a τ_{total} diminui exponencialmente com o comprimento percorrido pelos raios solares, ou seja, quanto menor o ângulo maior a atenuação. Além disso, o caminho atmosférico percorrido por DNI é menor nos locais de altitudes mais elevadas, assim a atenuação ocorre em maior grau nos locais localizados ao nível do mar (Gutiérrez-Trashorras et al., 2018). A região de estudo fica localizada a 786 m de altitude, que representa um menor caminho ótico a ser percorrido e consequentemente menor atenuação, quando comparado ao nível do mar.

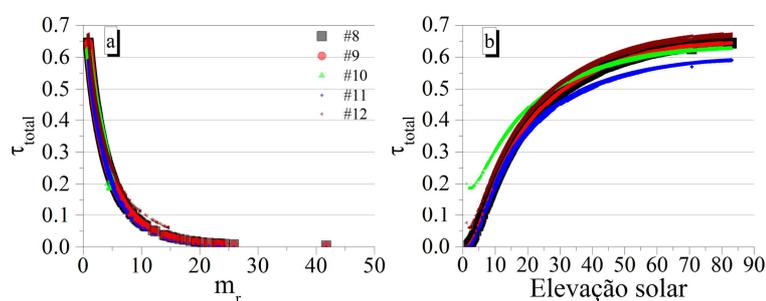


Figura 3: Curva de correlação entre a transmitância total (τ_{total}) e: a) massa do ar relativa (m_r) e b) Elevação solar (ES).

Comparação e validação dos modelos selecionados: Estudo de caso.

O desempenho dos modelos para dias específicos foi testado através de comparações entre as medidas e as estimativas. Os resultados obtidos de cada modelo durante os dias selecionados são visualizados na Figura 4(a – d), que mostra a evolução diurna para valores horários entre 06 e 18 h. Para analisar o modelo mais preciso sob o clima de Botucatu, apenas dias de céu claro em períodos diferentes foram considerados, no intuito de testar e validar. Os dias selecionados foram 30/12/2002 (Fig. 4a), 17/10/2003 (Fig. 4b), 17/01/2006 (Fig. 4c) e 21/11/2007 (Fig. 4d). As Figuras 4 (a – d) evidenciam que os valores de DNI estimados por alguns modelos mostram uma boa aproximação com os valores medidos. Os valores de DNI medidos e estimados pelos modelos crescem do início para o meio do dia, no mesmo sentido do aumento do ângulo de elevação solar, e das diminuições da massa ótica e da concentração de nuvens na atmosfera. A exceção é para a estimativa com o modelo #4 que possui comportamento inverso entre às 07:00 e 17:00h, diferente dos demais modelos mostra uma parábola com concavidade voltada para cima. As estimativas com os modelos acompanham bem as medidas. Os modelos #1 e #2 normalmente possuem suas curvas acima da medida, enquanto as demais estão

abaixo. Destacamos o modelo #6 que mostra com maior frequência está abaixo e mais distante da curva das medidas.

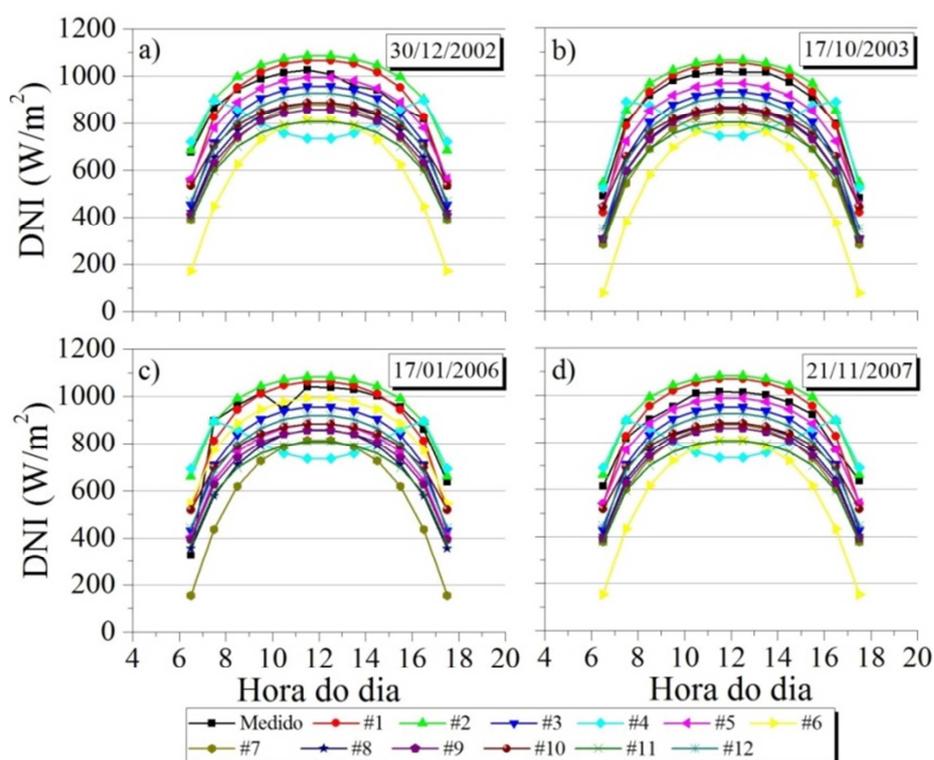


Figura 4: DNI medido e estimado pelos doze modelos para os dias selecionados. a) 30/12/2002, b) 17/10/2003, c) 17/01/2006 e d) 21/11/2007.

Os índices estatísticos de validação MBE, RMSE e MAPE para os dias selecionados são mostrados na Figura 5a – c. Esses índices permitem a detecção tanto das diferenças entre os dados experimentais quanto das estimativas dos modelos e da existência de tendências sistemáticas de subestimar ou superestimar. Os valores elevados ocorrem devido à propagação de erros como resultados do uso de parâmetros de entrada teóricos. Os modelos #3 a #12 subestimaram as medidas em todos os dias analisados (Figura 5a). Os modelos #1 e #2 superestimaram as medidas na maioria dos dias, concordando com a evolução diurna. Similarmente aos modelos #1 e #2, o modelo #5 subestimou com valores absolutos de MBE menores que 10%. Os menores valores de RMSE foram encontrados para os modelos #1 e #5, indicando não ultrapassar de 11% à dispersão (Figura 5b). Os maiores RMSE são para o modelo #6, resultando para os dias analisados valores superiores a 30%. Os modelos #9 e #11 estimaram com RMSE maiores que 20%. Em suma, os modelos #1 a #5 foram melhores que os modelos #6 a #12. Seguindo a mesma tendência de MBE e RMSE, o pior desempenho ao analisar o MAPE é encontrado para o modelo #6 (Figura 5c), que para alguns dias teve valores superiores a 40%. Para os modelos #1 a #5 a maioria dos valores de MAPE foram menores que 15%, enquanto os demais modelos acima de 15%.

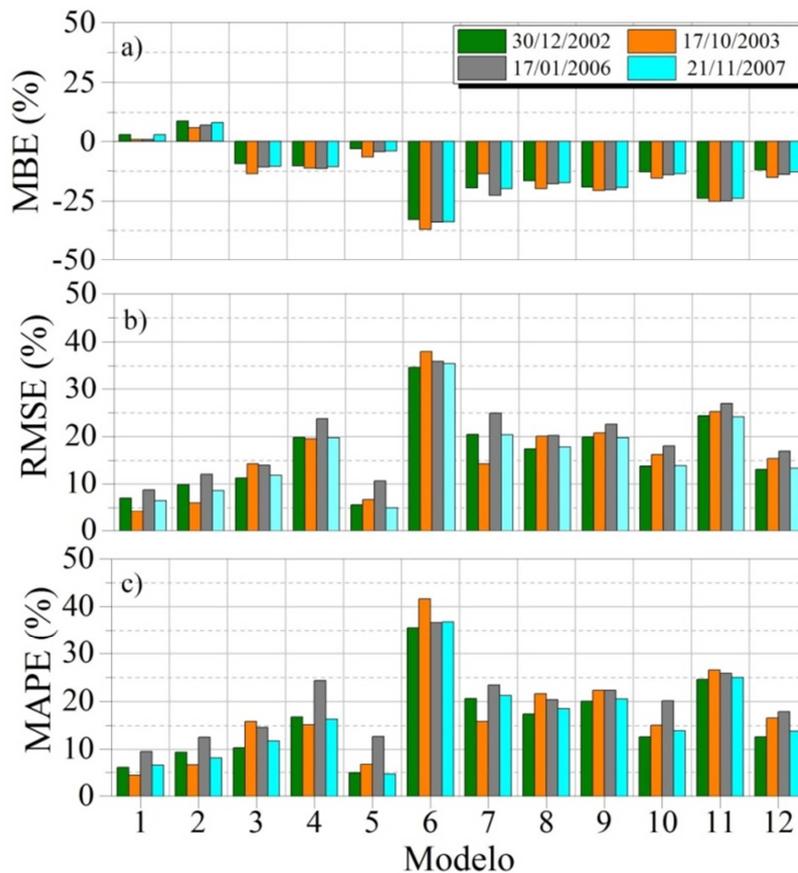


Figura 5: Índices estatísticos para os dias selecionados: a) MBE, b) RMSE e c) MAPE.

As análises pontuais desses resultados para os dias selecionados nos levam as seguintes observações: existe diferença no desempenho dos modelos, mesmo aqueles do mesmo grupo (simples e complexos). Existe uma grande diferença entre os sete modelos simples (#1 - #7). Os modelos #1 e #3 foram mais consistentes que os outros modelos mais simples e os mais sofisticados (que usam um grande número de entrada). No entanto, o modelo #6 apresentou maior incerteza. Os modelos mais sofisticados (#8 - #12) tiveram desempenho estatístico inferior ao esperado, resultando em uma maior propagação de erros da estimativa dos parâmetros de entrada dos modelos. As estações especializadas que relatam esses dados ainda são muito escassas, o que constitui uma limitação na modelagem.

Devido à grande variedade de resultados entre modelos simples e os mais complexos, deve ser entendido, por exemplo, que a análise de desempenho dos modelos para dias específicos pode mostrar resultados incompletos e tendenciosos, necessitando de uma validação com série de dados maior. Nessa análise foram utilizados dados específicos dos mesmos dias. Outro ponto a destacar é o fator dos dias separados serem pertencentes a meses do período chuvoso. Uma análise dos modelos com base na sazonalidade torna-se interessante. Como foram observados, os resultados dos modelos simples indicam melhor desempenho que dos modelos mais complexos. Por outro lado, foi observado com a base total que todos os modelos mais complexos executam geralmente melhor a estimativa de DNI do que os modelos mais simples, o que não surpreende.

CONCLUSÕES

Doze modelos de estimativa de DNI foram avaliados para verificar seu desempenho na região de Botucatu, a fim de aplicação solarimétrica para futuros projetos de concentração de energia solar. Esta análise é de grande importância, principalmente nos locais, onde estações solarimétricas não estão disponíveis. Devido a não disponibilidade na região de estudo, alguns parâmetros de entrada dos modelos foram estimados.

Considerando a análise total da base de dados, como seria de esperar, a previsão de DNI com os modelos que demandam mais parâmetros atmosféricos de entrada tendem a ter um desempenho melhor e um pouco mais consistente do que aqueles que exigem poucos ou nenhum desses parâmetros. O modelo #7 com poucos parâmetros de entrada e utilizando a turbidez de Linke tende a apresentar desempenho similar aos dos modelos mais sofisticados. Os modelos #10 (MRM5) e #12 (Yang) tiveram os melhores resultados. Os erros na estimativa dos parâmetros de entrada se propagaram para as estimativas de DNI. Analisando os resultados para os estudos de caso nos dias selecionados, os modelos mais complexos, não foram mais precisos que os modelos mais simples. No entanto, não podemos considerar esse resultado isoladamente. Para um estudo mais apropriado, a análise sazonal torna-se necessário.

O trabalho pode servir como uma ferramenta interessante e necessária para calcular DNI horário para sistemas de energia solar. É conveniente lembrar que os melhores resultados obtidos pelos modelos mais sofisticados são condicionados à disponibilidade de observações locais dos parâmetros com alta qualidade. Mais pesquisas com observações terrestres de alta qualidade para DNI são desejadas para aumentar a precisão de aplicações de energia solar em qualquer local.

REFERÊNCIAS

- Allen R. G. (1996). Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, v.122:97–106.
- Bird R. E. e Hulstrom R. L. (1980). *Direct insolation models*. Golden, CO: Solar Energy Research Institute (SERI/NREL), (SERI/TR-335-344).
- Dumortier D. (1995). *Modelling global and diffuse horizontal irradiances under cloudless skies with different turbidities*. Technical report for the Daylight II project, JOU2-CT92-0144.
- Escobedo J. F., Gomes E. N., Oliveira A. P., Soares J. (2011). Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, v.36, p.169-178.
- Fu P. e Rich P. (1999). Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*.
- Gueymard C. A. (2003a). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: Detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy*, v. 74, p. 355–379.
- Gueymard C. A. (2003b). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high quality measurements. *Solar Energy*, v. 74, p. 381–395.
- Gueymard C. A. (2004). Direct solar transmittance and irradiance prediction with broadband models. Part II: validation with high-quality measurements. *Solar Energy* v. 74, p. 381-395, 2003, with Corrigendum., *Solar Energy*, v.76, p.515.
- Gueymard C. A. (2005). Importance of atmospheric turbidity and associated uncertainties in solar radiation and luminous efficacy modelling. *Energy*, v.30, p.1603–21.
- Gueymard C. A. (2008). REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*, v. 82,p.272–285.
- Gueymard C. A. (2012). Temporal variability in direct and global irradiance at various time scales as a affected by aerosols. *Solar Energy*, doi:10.1016/j.solener.2012.01.013.
- Gueymard C. A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy* v.86, p. 2145–2169.
- Gueymard C. A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.39, p.1024–1034.
- Gueymard C. A. e Ruiz-Arias J. A. (2015). Validation of direct normal irradiance predictions under arid conditions: A review of radiative models and their turbidity dependent performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 379–396.

- Gutiérrez-Trashorras A. J. et al. (2018). Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.81, p.93–106.
- Hottel H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy* 18, 129–134.
- Iqbal M. (1983). *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press. 390p.
- Kambezidis H. D. e Psiloglou B. E. (2008). The Meteorological Radiation Model (MRM): advancements and applications. In: Badescu V, editor. *Modeling solar radiation at the Earth surface*. Berlin: Springer. p. 357–92.
- Karayel M., Navvab M., Ne’eman E., Selkowitz S. (1984). Zenith luminance and Sky luminance distributions for daylighting calculations. *Energy and Buildings*, v. 6, n.3, p. 283-91.
- Madkour M. A., El-Metwally M., Hamed A. B. (2006). Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere. *Renewable Energy*, v. 31, p. 361-382.
- Majumdar N. C. Mathur B. L. Kaushik S. B. (1972). Prediction of direct solar radiation for low atmospheric turbidity. *Solar Energy*, v.13:383–94.
- Mghouchi Y. E. Bouardi A. E. Choulli Z. Ajzoul T. (2016). Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.56, p.87–99.
- Perrin de Brichambaut, C. e Vauge, C. (1982). *Le Gisement Solaire*. Lavoisier, Paris.
- Polo J. e Estalayo G. (2015). Impact of atmospheric aerosol loads on concentrating solar power production in arid-desert sites. *Solar Energy* 115, 621–631.
- Remer L. A. et al. (2008). Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, p. 1-18.
- Saïghi M. (2002). *Nouveau modèle de transfert hydrique dans le système sol- planteatmosphère (Thèse de Doctorat)*. Alger: USTHB.
- Yang K., Huang, G.W. Tamai, N. (2001). A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy*, v. 70, p. 13–22.
- Younes S. e Muneer T. (2007). Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data-base. *Applied Energy* 84, 623–645.

Abstract: The modeling of direct irradiance at normal incidence (DNI) in the clear sky condition is important for different solarimetric applications. In this study, a performance review of 12 radiative transfer models is presented. These models are used to estimate the DNI in day of clear sky in the hourly partition, in the region of Botucatu/SP/Brazil. The revised models are categorized into two classes, simple and complex models. MBE, RMSE and MAPE were used to evaluate the performance of the models. Models requiring more atmospheric inputs (complex models) generally performed better than the simpler models. The DNI estimate with the simpler models is less accurate and has larger errors. Despite consistent limitations in the use of estimated parameters, the performance of the models can be considered satisfactory based on the metric of the statistical indices. The best performances are highlighted for models # 10 (MRM5) and # 12 (Yang).

Keywords: Solar irradiation, Clear sky, Radiative transfer, Validation.