

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA A PARTIR DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Guedes, M.^{1,2}; Pes, M. P.^{1,2}; Bertagnolli, R. F.^{1,2}; Fiorin, D.V.^{1,2}; Guarneri, R. A.³; Martins, F. R.³; Pereira, E. B.³; Schuch, N. J.¹.

RESUMO: O objetivo desse trabalho é a realização de um estudo para obtenção de estimativas da componente difusa da irradiação solar a partir dos índices K_t , K_d e K obtidos a partir de dados coletados em superfície. O estudo é baseado em dados de superfície coletados na estação SONDA em operação no Observatório Espacial do Sul (29,4°S; 53,8°O) em São Martinho da Serra. Inicialmente, realizou-se uma avaliação do comportamento dos modelos empíricos desenvolvidos por Collares-Pereira e Rabl (CPR) e por Ruth e Chant (RC). Posteriormente, um novo modelo empírico (denominado, SMS) foi desenvolvido a partir de dados coletados na mesma estação e seguindo metodologia semelhante aos modelos CPR e RC. O modelo SMS apresentou um melhor desempenho na estimativa de K , com RMSE de $0,073 J/m^2$ e MBE inferior a $-0,001 J/m^2$, enquanto os demais modelos apresentaram RMSE entre $0,108$ e $0,111 J/m^2$, e MBE entre $0,043$ e $0,048 J/m^2$.

ABSTRACT: This paper aims at describing a study to obtain diffuse solar radiation estimates from K , K_t and K_d indexes calculated from solar radiation ground data acquired in the SONDA measurement site located in Southern Space Observatory (29,4°S; 53,8°O), in São Martinho da Serra. First of all, empiric models described by Collares-Pereira and Rabl (CPR) and by Ruth and Chant (RC) were employed and their performance was evaluated using mean bias error and root mean square error. Afterwards, a new empiric model, designates as SMS, was developed following a similar methodology. The model SMS showed a better performance when compared to CPR and RC models. The model SMS presented a RMSE= $0,073 J/m^2$ and MBE lower than $-0,001 J/m^2$. The other two models presented a RMSE between $0,108$ and $0,111 J/m^2$, and MBE between $0,043$ and $0,048 J/m^2$.

Palavras-chave: radiação-solar, modelo, energético.

INTRODUÇÃO

Estudar radiação solar incidente na superfície terrestre tem implicações diretas na meteorologia, especialmente nos estudos sobre o clima e suas mudanças. Informações oriundas do estudo da radiação solar são também importantes para atividades econômicas como a agropecuária (seleção dos produtos a serem cultivados, processo de irrigação, períodos de plantio e colheita, etc..), a arquitetura (eficiência energética, conforto térmico e iluminação de ambientes), e diversos outros setores do conhecimento e atividades humanas [1].

¹ Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT - Caixa Postal 5021 - CEP 97110-970 – Santa Maria (RS), Brasil, (55)3220-8021, (marcelo, guedes, rafaelb, danielfiorin, njschuch)@lacesm.ufsm.br.

² Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM, cooperação INPE/UFSM.

³ CPTEC/INPE, Av. Astronautas 1758, 12227-010, São José dos Campos (SP), (12)3945-6738, (ricardog, eniobp)@cptec.inpe.br, fernando@dge.inpe.br.

Informações provenientes da previsão de radiação solar incidente são de vital importância na operação de sistemas híbridos de geração de eletricidade, permitindo um gerenciamento mais eficiente das fontes de energia e o emprego otimizado de energia solar-fotovoltaica, em prol da economia de outros recursos. Além de permitir o conhecimento antecipado da disponibilidade de energia solar para geração fotovoltaica em locais isolados, as previsões de irradiação solar permitem estimar a demanda por aquecimento resistivo complementar em sistemas solar-térmicos.

Com o objetivo de estimar a radiação solar difusa a partir de medidas de radiação global, modelos empíricos são descritos na literatura científica (Collares-Pereira e Rabl, 1979; Ruth e Chant, 1976; Liu e Jordan, 1960). Este trabalho visa avaliar a precisão destes modelos quando aplicados à região sul do Brasil. Além disso, este trabalho descreve o desenvolvimento e ajuste de um modelo específico para o estado do Rio Grande do Sul. O modelo baseia-se em uma metodologia semelhante a utilizada nos modelos anteriormente citados. Com esta finalidade, se fará uso de medidas de radiação providas por uma estação da rede SONDA, situada no Observatório Espacial do Sul, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT (29,4°S; 53,8°O), na região central do estado do Rio Grande do Sul. O observatório e a estação são operados em parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria da Universidade Federal de Santa Maria – LACESM/CT - UFSM. A rede SONDA é um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT, coordenado pela divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE – MCT.

METODOLOGIA

Os dados solarimétricos utilizados nesse trabalho foram coletados na estação SONDA situada no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT), em São Martinho da Serra - RS (Lat. 29,44°S, Lon. 53,82°O). A rede nacional SONDA segue os padrões internacionais de medidas e instalação de seus equipamentos. Os dados coletados são submetidos a um programa de qualidade baseado nos padrões definidos pela WMO (World Meteorological Association) para a rede BSRN (Baseline Solar Radiation Network) com estações espalhadas ao redor de todo o planeta.

A radiação global (direta + difusa) incidente à superfície é medida por um piranômetro *Kipp & Zonen CM 21*, sensível a uma faixa de comprimentos de onda entre 0,3 µm a 2,8 µm. Um piranômetro *Kipp & Zonen CM22* é utilizado nas medidas de irradiação solar difusa na faixa espectral entre 0,2 µm a 3,6 µm. O piranômetro *CM22* opera em conjunto com um *TRACKER – 2AP – Two Axis Positioner* – que é responsável pelo posicionamento dos ocultadores solares. Ocultadores são esferas que efetuam o sombreamento do domo do *CM22* impedindo que o elemento sensor sofra a incidência da componente direta do feixe de radiação solar.

Os equipamentos efetuam medidas a cada 1 segundo e armazenam uma média dos dados para cada 60 segundos, fornecendo 1440 medidas diárias. Neste trabalho, os dados de irradiação global e difusa foram integrados ao longo do dia, fornecendo valores de energia total diária em Jm^{-2} (Joules por metro quadrado). As integrais de radiação global e radiação difusa serão daqui por diante referidas apenas como H e H_d , respectivamente. O período de dados utilizados compreende o intervalo de agosto de 2004 (início de operação da estação) até junho de 2006, totalizando 699 dias de coleta. O mês de outubro de 2004 foi descartado uma vez que os dados foram marcados como suspeitos de erro pelo programa de qualificação dos dados. Posteriormente, verificou-se a ocorrência de falha de posicionamento do ocultador do disco solar que comprometeu a confiabilidade das medidas de radiação difusa nesse período.

A irradiação incidente no topo da atmosfera (TOA), representada por H_0 , foi determinada por meio da expressão:

$$H_0 = \frac{I_{sc}}{\pi} \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 [h_0 \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(h_0)] \quad (1)$$

onde I_{sc} é a constante solar, igual a 1368 Wm^{-2} , $(d_m / d)^2$ é o fator de correção de excentricidade, d_m é a distância média entre o Sol e a Terra, d é distância entre o Sol e a Terra para o dia específico, φ representa a latitude do sítio observado, δ é a declinação solar e h_0 é o ângulo horário, definido como zero ao meio-dia [2].

De posse de H_0 , H e H_d foram calculados o índice de nebulosidade, K_T , e os parâmetros de radiação difusa, K_d e K , conforme definição apresentada em Iqbal (1983):

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad K_d = \frac{H_d}{H_0} \quad K = \frac{H_d}{H} \quad (2)$$

Os valores de K e K_T são adimensionais, variando entre 0 e 1. Os parâmetros K_T , K e K_d , obtidos a partir dos dados medidos na estação, foram comparados com os modelos empíricos RC e CPR e SMS.

Ruth e Chant (1976) [3] analisando dados de estações de medidas localizadas no Canadá desenvolveram um modelo empírico, aqui referenciado como RC, descrito pelas equações apresentadas em (3). Collares-Pereira and Rabl (1979) [4] com dados coletados em estações solarimétricas nos Estados Unidos desenvolveram um modelo similar descrito pelas equações apresentadas em (4) e designado neste trabalho por CPR:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.98 \\ (K_T \leq 0.1) \\ 1.910 + 1.154K_T - 4.936K_T^2 - 2.848K_T^3 \\ (0.1 \leq K_T \leq 0.7) \end{cases} \quad (3)$$

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

Utilizando uma metodologia semelhante à utilizada por RC e CPR, foi desenvolvido um modelo empírico para o Rio Grande do Sul para estimar o valor de K a partir de K_T conforme a Equação 5.

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1,01318 - 0,17824K_T - 1,83105K_T^2 - 2,10012K_T^3 + 2,84587K_T^4 \\ (0.17 \leq K_T \leq 0.8) \end{cases} \quad (5)$$

RESULTADOS

O parâmetro K em função de K_T é apresentado na Figura 1. As curvas dos modelos SMS, RC e CPR são apresentadas para comparação. Analisando o gráfico, verifica-se que a dispersão dos valores medidos em superfície cresce na medida em que a nebulosidade diminui (a partir de $K_T > 0,3$). A variabilidade das propriedades óticas da atmosfera em função do transporte de poluentes pode ser apontada como uma das causas prováveis dessa dispersão. O espalhamento causado por aerossóis atmosféricos passa a desempenhar um papel mais importante na transmitância atmosférica à medida que a nebulosidade, principal fator de modulação da radiação solar incidente na superfície, torna-se menor. Quanto maior a concentração de aerossóis maior será a parcela de radiação solar difusa. Alguns estudos mostram que ocorre o transporte de poluentes emitidos em eventos de queimadas, principalmente entre os meses de junho a outubro [5].

Verifica-se boa concordância entre os dados de superfície e as estimativas fornecidas pelos modelos, principalmente quando K_T é inferior a 0,7. Entre os modelos utilizados no estudo, o modelo SMS apresentou os menores desvios - RMSE de $0,073 J.m^{-2}$ e MBE inferior a - $0,001 J.m^{-2}$. O modelo CPR apresentou os maiores desvios - RMSE = $0,111 J.m^{-2}$ e BEM = $0,048 J.m^{-2}$, enquanto que o modelo RC produziu estimativas com RMSE = $0,108 J.m^{-2}$ e MBE = $0,043 J.m^{-2}$.

Os modelos RC e CPR apresentaram maiores discrepâncias em relação aos valores medidos nos dias de céu claro ($K_T > 0.7$). Os dois modelos apresentaram estimativas para os valores de K superiores que os valores medidos, de modo que, a irradiação difusa é superestimada por ambos os modelos.

Fazendo uma análise apenas para dias com $K_T > 0.7$, o modelo SMS apresentou um desempenho muito superior aos demais, ficando com um MBE inferior a $0,001 J.m^{-2}$ e um RMSE de $0,012 J.m^{-2}$. Enquanto o modelo RC apresentou um MBE de $0,049 J.m^{-2}$ e um RMSE de $0,111 J.m^{-2}$ e para o modelo CPR um MBE de $0,079 J.m^{-2}$ e um RMSE de $0,158 J.m^{-2}$.

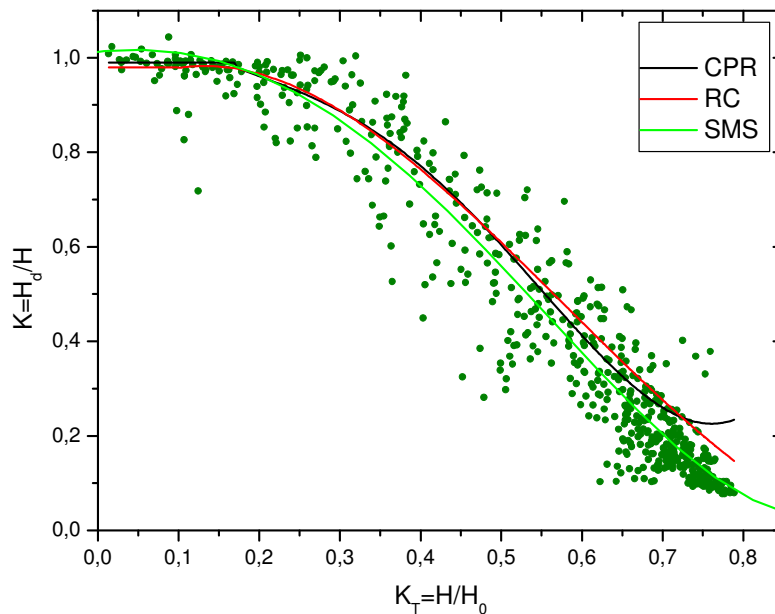


Figura 1. Fração de radiação difusa (K), com relação ao índice de nebulosidade (K_T) e as correlações RC e CPR para o Observatório Espacial do Sul.

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados embora preliminares apresentam um bom nível de confiança para estimativas de irradiação solar difusa a partir de valores de irradiação global medidos em superfície. Essa estimativa é de grande valia, visto uma maior complexidade e os maiores custos em se medir radiação difusa. Os desvios apresentados pelo modelo empírico SMS, são de $0,073 J.m^{-2}$ para RMSE e inferior a $-0,001 J.m^{-2}$ para MBE, enquanto os demais modelos apresentaram RMSE entre $0,108 J.m^{-2}$ e $0,111 J.m^{-2}$, e MBE entre $0,043 J.m^{-2}$ e $0,048 J.m^{-2}$.

Foi observados desvios entre os dados experimentais e os modelos CPR e RC, especialmente para os dias de céu claro. O modelo SMS apresentou melhor precisão e confiabilidade quando comparado aos modelos CPR e RC. Um próximo passo a ser realizado, é identificar com uma melhor precisão quais fatores afetam na dispersão dos pontos no gráfico da Figura 1, assim como efetuar uma comparação com os resultados do mapeamento de irradiação difusa para o Rio Grande do Sul apresentados pelo Atlas Solarimétrico Brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, através do Fundo Setorial de Energia – CT – ENERJ pelo financiamento do Projeto SONDA. Ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT pelo estágio de MPP e ao Programa PIBIC/INPE – MCT – CNPq/MCT pela aprovação dos Projetos de MG, RFB e DVF. E a todos que de alguma forma colaboraram para elaboração desse trabalho..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Fernando Ramos Martins et. Al., NIVEIS DE ILUMINAÇÃO DO CÉU AO ALVORECER E NO OCASO. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza 2004.
- 2 IQBAL, M., 1983, An Introduction to Solar Radiation: Academic Press Canadá , Toronto, 390p;
- 3 RUTH, D. W., CHANT, R. E., 1976, The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canadá: Solar Energy, Vol. 18 (2), p153-154;
- 4 COLLARES-PEREIRA, M., RABL, A., 1979, The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values: Solar Energy, Vol. 22 (2), p155-164.
- 5 Saulo R. Freitas et. Al, Monitoring the Transport of Biomass Burning Emissions in South America, Environmental Fluids Mechanics (2005) 5: 135-167.