

ANÁLISE DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA DA ESTAÇÃO SONDA DE SÃO MARTINHO DA SERRA, RS, BRASIL (29,4°S; 53,8°O)

Marcus Guedes, Daniel V. Fiorin, Marcelo P. Pes, Rafael F. Bertagnolli, Nelson J. Schuch
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria
LACESM/CT – UFSM

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

Ricardo A. Guarnieri, Fernando R. Martins, Enio B. Pereira
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos -
DMA/CPTEC/INPE – MCT

Av. dos Astronautas, 1758, C.P. 515, CEP 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
ricardog@cptec.inpe.br, fernando@dge.inpe.br, eniobp@cptec.inpe.br

Abstract. This work aims to present an analysis of the incident solar radiation data, measured by a SONDA-project station in the Southern Space Observatory, Brazil. Global and diffuse solar radiation data were collected by pyranometers Kipp&Zonen CM21 and CM22, from August/2004 to December/2005. The measured parameters K_T , K_d and K were compared to empirical models described in literature. It was found good agreement between model estimates and ground data. However, it was observed small differences which were discussed in the paper. Analysis of larger series of data and development of specific models for the Brazilian South region are demanded to better estimate diffuse irradiation from ground measurements of global solar irradiation.

Resumo. O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise de dados de radiação solar incidente em superfície, medidos em estação de referência SONDA, situada no Observatório Espacial do Sul, RS, Brasil. Dados de radiação solar global e difusa, medidos por piranômetros Kipp&Zonen CM21 e CM22 foram coletados no período de Agosto de 2004 (início de operação da Estação) a Dezembro de 2005. Os parâmetros K_T , K_d e K conforme descrito por Iqbal, (1983) foram comparados modelos empíricos descritos na literatura científica. Os resultados revelaram que as observações apresentam boa concordância com os modelos adotados no estudo, e os pequenos desvios encontrados são discutidos. Concluiu-se ser importante a análise de séries temporais mais longas de dados de radiação solar e o desenvolvimento de modelos específicos para a região central do Rio Grande do Sul a fim de obter estimativas de irradiação difusa a partir de medidas de irradiação solar global incidente na superfície.

INTRODUÇÃO

O Sol emite radiação em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético conforme descrito pela Lei de Planck. Após incidir no topo da atmosfera, a radiação solar interage com os elementos atmosféricos – gases atmosféricos, nuvens e partículas em suspensão – e a superfície do planeta, por meio de processos de absorção e espalhamento (Liou, 1980). Devido ao processo de espalhamento, a radiação solar que atinge a superfície encontra-se dividida em duas componentes: difusa e direta. A radiação direta é a componente que atinge a superfície na direção do feixe da radiação solar e não sofreu interações com a atmosfera. A radiação difusa é decorrente dos processos de espalhamento da radiação solar na atmosfera e, portanto, é oriunda de todas as direções do céu. A soma das duas componentes resulta na radiação solar global.

O estudo da radiação solar incidente encontra aplicações em pesquisas meteorológicas, na agricultura, na arquitetura (aquecimento e iluminação natural de ambientes) e no setor de energia. O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala de tempo terrestre, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas mais promissoras nos desafios contra a escassez energética do novo milênio. O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia.

O estudo da disponibilidade de radiação solar pode ser feito através do uso de modelos computacionais baseados em dados de satélites, ou por meio de medidas em superfície. Modelos computacionais são utilizados para prover estimativas da distribuição espacial da radiação incidente. Estudos com estes modelos mostram que o Rio Grande do Sul, apesar de sua localização no extremo sul do Brasil, apresenta um grande potencial para aproveitamento da energia solar como fonte de energia renovável (Colle e Pereira, 1998).

Quando o conhecimento de valores locais exige maior precisão, é necessário o uso de dados medidos em superfície. Grande parte das medidas de radiação em superfície contempla apenas a radiação solar global. Contudo, o conhecimento da componente difusa encontra aplicações em diversos ramos da atividade humana, dentre as quais aquelas mencionadas anteriormente.

Com o objetivo de estimar a radiação difusa a partir de medidas de radiação global, diversos 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. Com esta finalidade, se fará uso de medidas de radiação providas por uma estação de referência do projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o setor de energia), 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. 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.

DADOS E METODOLOGIA

Os dados de radiação solar utilizados nesse trabalho foram coletados pela estação de referência do Projeto SONDA, localizada no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE–MCT). Além da medida de radiação solar, esta estação coleta dados de velocidade e direção do vento e dados meteorológicos básicos.

A estação iniciou medições em Agosto de 2004, utilizando piranômetros: modelo *Kipp & Zonen CM21*, para a radiação solar global (de 0,3 μm a 2,8 μm); e modelo *Kipp & Zonen CM22* (de 0,2 μm a 3,6 μm), em conjunto com rastreador solar modelo *Kipp & Zonen Two Axis Positioner 2AP*, para a radiação difusa. A plataforma de equipamentos da estação no Observatório é mostrada na Figura 1, e no detalhe os respectivos piranômetros CM21 e CM22.

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.



Figura 1. Estação SONDA no OES em São Martinho da Serra, RS: (a) Plataforma com os sensores solarimétricos; (b) piranômetro CM22; (c) piranômetro CM21.

Para obter a radiação incidente no topo da Atmosfera (TOA), representada por H_0 , utilizou-se a expressão de Iqbal (1983):

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

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, j representa a latitude do sítio observado, δ é a declinação solar e h_0 é o ângulo horário, definido como zero ao meio-dia.

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 , de acordo com Iqbal (1983):

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

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

$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.98 & (K_T \leq 0.1) \\ 1.910 + 1.154K_T - 4.936K_T^2 - 2.848K_T^3 & (0.1 \leq K_T \leq 0.7) \end{cases}$	(3)
$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & (K_T \leq 0.17) \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4 & (0.17 \leq K_T \leq 0.8) \end{cases}$	(4)

O período de dados utilizado para este trabalho foi de 01/08/2004 a 31/12/2005. Após seleção dos dados, foi excluído o mês de Outubro de 2004 por ter sido verificada falha no ocultador do disco solar, comprometendo as medidas de radiação difusa. Foram analisados dados de obtidos em 473 dias. Os parâmetros K_T , K e K_d , calculados com estes dados, foram comparados com as correlações RC e CPR.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2, são apresentadas as curvas do ciclo diário de irradiância para dias específicos, que exemplificam as quatro situações mais comuns observadas: (a) céu claro (sem nuvens); (b) céu com nuvens esparsas; (c) céu totalmente encoberto com nuvens de baixa espessura ótica (cirrus); (d) céu encoberto com nuvens de elevada espessura ótica. Valores das integrais diárias de radiação global, difusa e radiação solar no topo da atmosfera, bem como os valores de K_T , K_d , e K , são apresentados nos gráficos.

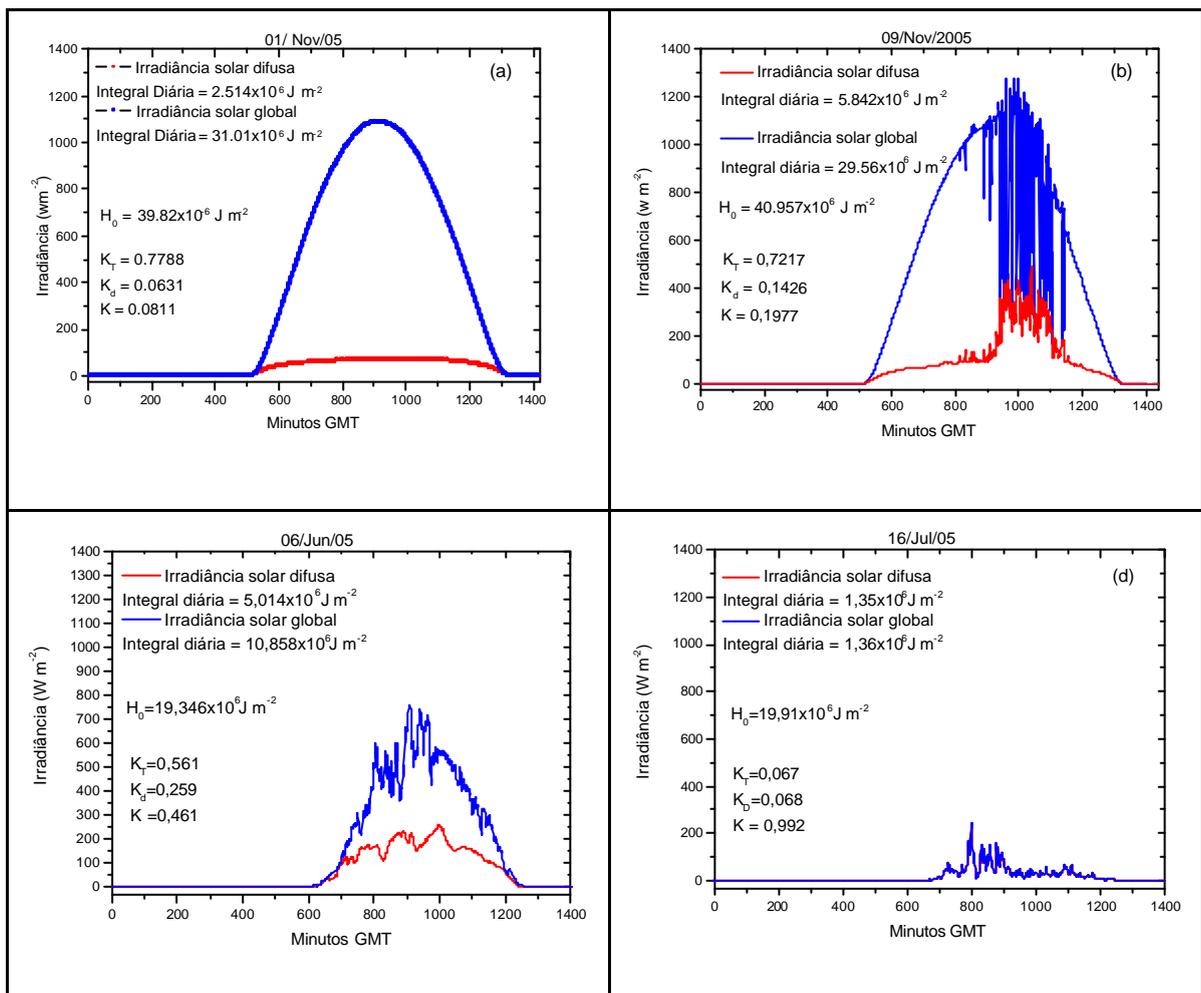


Figura 2. Curvas de irradiância solar global e difusa para o OES em dias com diferentes condições de nebulosidade: (a) céu claro; (b) céu com nuvens esparsas; (c) céu totalmente encoberto; (d) céu encoberto com nuvens de elevada espessura ótica.

Observa-se que em dias sem nuvens - Figura 2(a) - a radiação difusa diária é consideravelmente inferior à radiação global diária. Em dias com alguma nebulosidade - Figura 2(b) - a irradiância difusa representa uma fração maior da radiação global, em decorrência do espalhamento pelas nuvens, e tanto a radiação global, como a difusa, apresentam maior variabilidade ao longo do dia.

Em dias totalmente encobertos, com nuvens de baixa espessura ótica - Figura 2(c) - a irradiância difusa representa uma grande fração da irradiância global ao longo de todo o dia, sendo a irradiância global inferior ao que seria observado em condições de céu claro. Em dias encobertos com nuvens espessas Figura 2(d), a componente direta da radiação é totalmente espalhada, de maneira que a irradiância global é composta apenas pela irradiância difusa.

As séries temporais das integrais diárias de irradiância global, irradiância difusa, e irradiação solar no topo da atmosfera são exibidas na Figura 4. Os dados de Outubro de 2004 foram omitidos, devido a problemas observados no sistema de medida de radiação difusa no período. A diferença entre as curvas de radiação no topo da atmosfera (TOA) e radiação global representa a fração de radiação solar refletida pela atmosfera para o espaço.

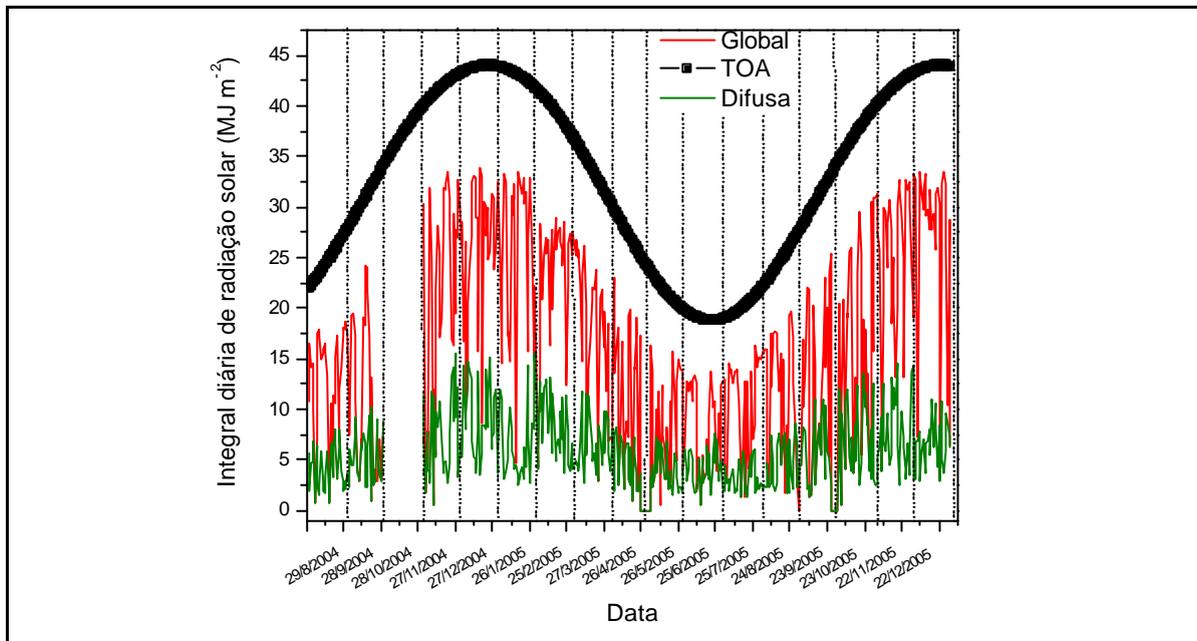


Figura 3. Integrais diárias de irradiância solar global e difusa no TOA observadas na estação localizada no Observatório Espacial do Sul entre 08/2004 a 12/2005.

Para todos os dias válidos foram calculados os parâmetros K_T , K_d e K . O parâmetro K em função de K_T é apresentado na Figura 4. As curvas das correlações RC e CPR são apresentadas para comparação. Verifica-se grande semelhança de comportamento entre os dados experimentais e as correlações. Os dias de céu claro ($K_T > 0.7$) apresentaram valores de K menores que os calculados pelas correlações de RC e CPR. Assim, as correlações estimam maiores valores de radiação difusa, do que os observados, para os mesmos

valores de K_T . Apesar da semelhança, alguns pontos (indicados por setas) apresentaram grandes desvios em relação aos valores estimados pelas correlações.

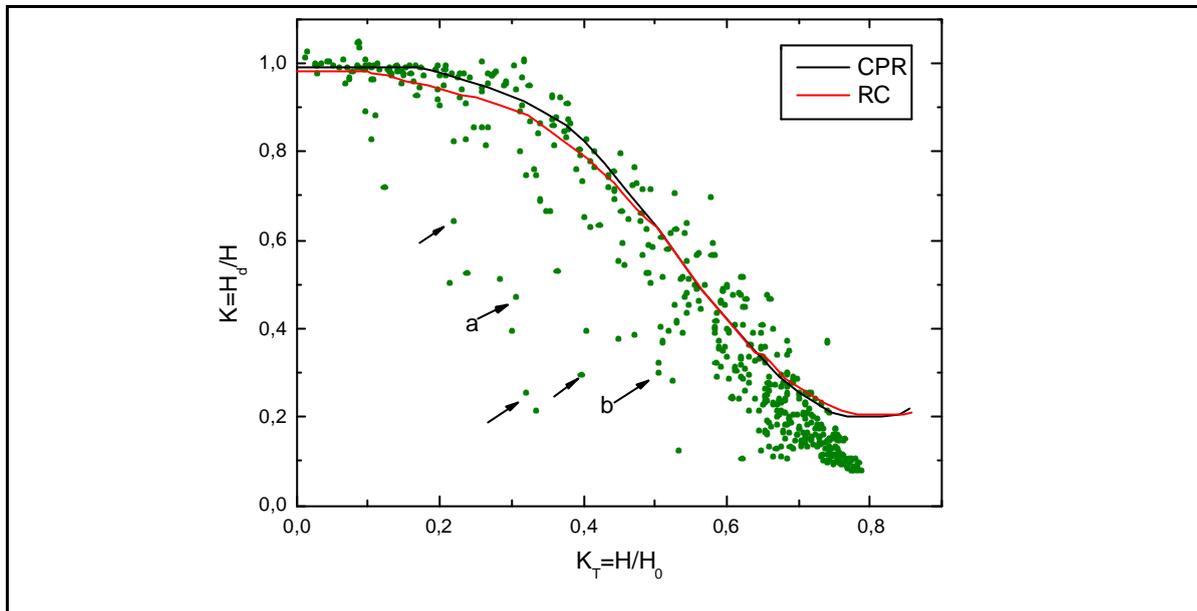


Figura 4. Fração de radiação difusa (K), com relação ao índice de nebulosidade (K_T) e as correlações RC e CPR para o Observatório Espacial do Sul.

Os valores de K_d em função de K_T são apresentados na Figura 5, bem como a curva da variação da radiação difusa diária em função de K_T determinada por Iqbal (1983). Verifica-se grande semelhança entre os valores experimentais e a curva teórica, exceto para os valores de K_T maiores que 0,7. Os pontos destacados por setas são os mesmos indicados na Figura 4, isto é, valores que tiveram desvio com relação às curvas de correlação.

Estudos de caso foram realizados para os dois pontos indicados por “a” (24/11/2005) e “b” (27/06/2005), nas Figuras 4 e 5, com objetivo de avaliar a razão das discrepâncias. As curvas de radiação para estes dias são apresentadas na Figura 6, juntamente com uma curva de radiação global de um dia de céu claro próximo. Verificou-se a ocorrência de condições de nebulosidade totalmente opostas no decorrer destes dias, isto é, os dias apresentaram parte do dia com céu totalmente encoberto e parte do dia com céu claro.

As disparidades observadas entre os valores experimentais e os modelos teóricos, nas Figuras 4 e 5, para $K_T > 0,7$, podem ser devido à diferença de latitude entre a estação de São Martinho da Serra (29.44° S) e as estações empregadas no desenvolvimento das correlações RC e CPR (31° a 53° N). Essa

diferença de latitude poderia ocasionar um maior espalhamento para latitudes maiores, uma vez que o caminho ótico é maior para este caso. Outra possível razão para as diferenças são as distintas características atmosféricas (poluição, aerossóis) entre os locais estudados (Guarnieri et al., 2005).

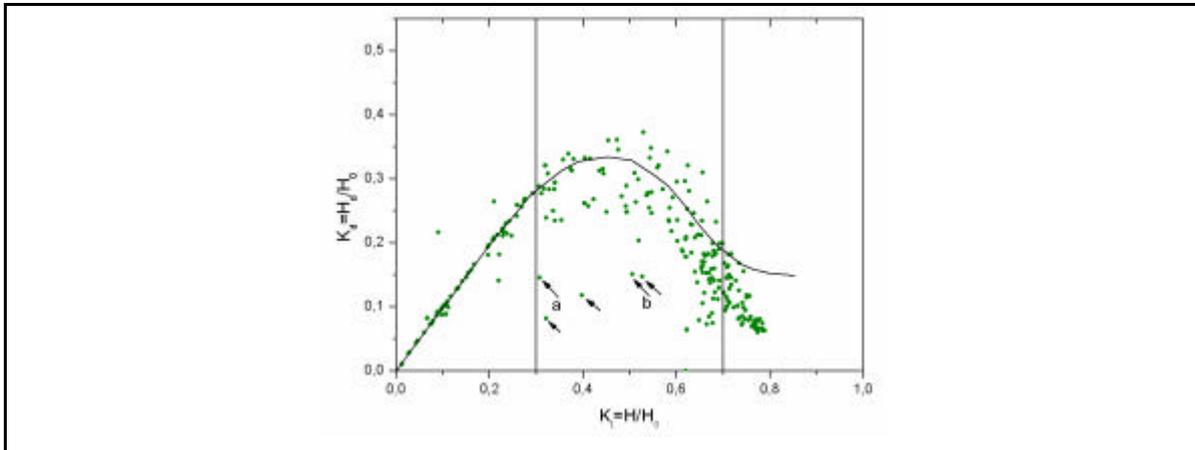


Figura 5. Variação da radiação difusa diária em função de K_T segundo Iqbal (1983) – curva – e dados diários de K_d e K_T para o Observatório – pontos.

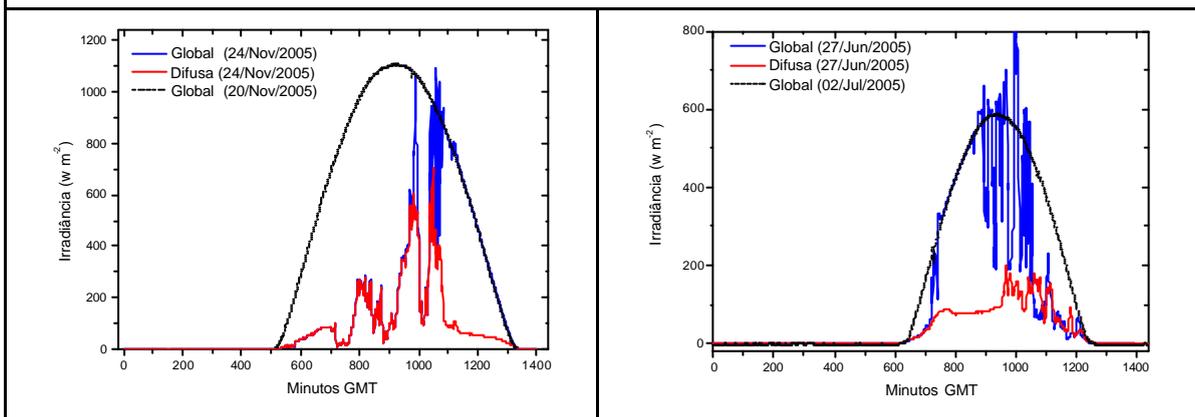
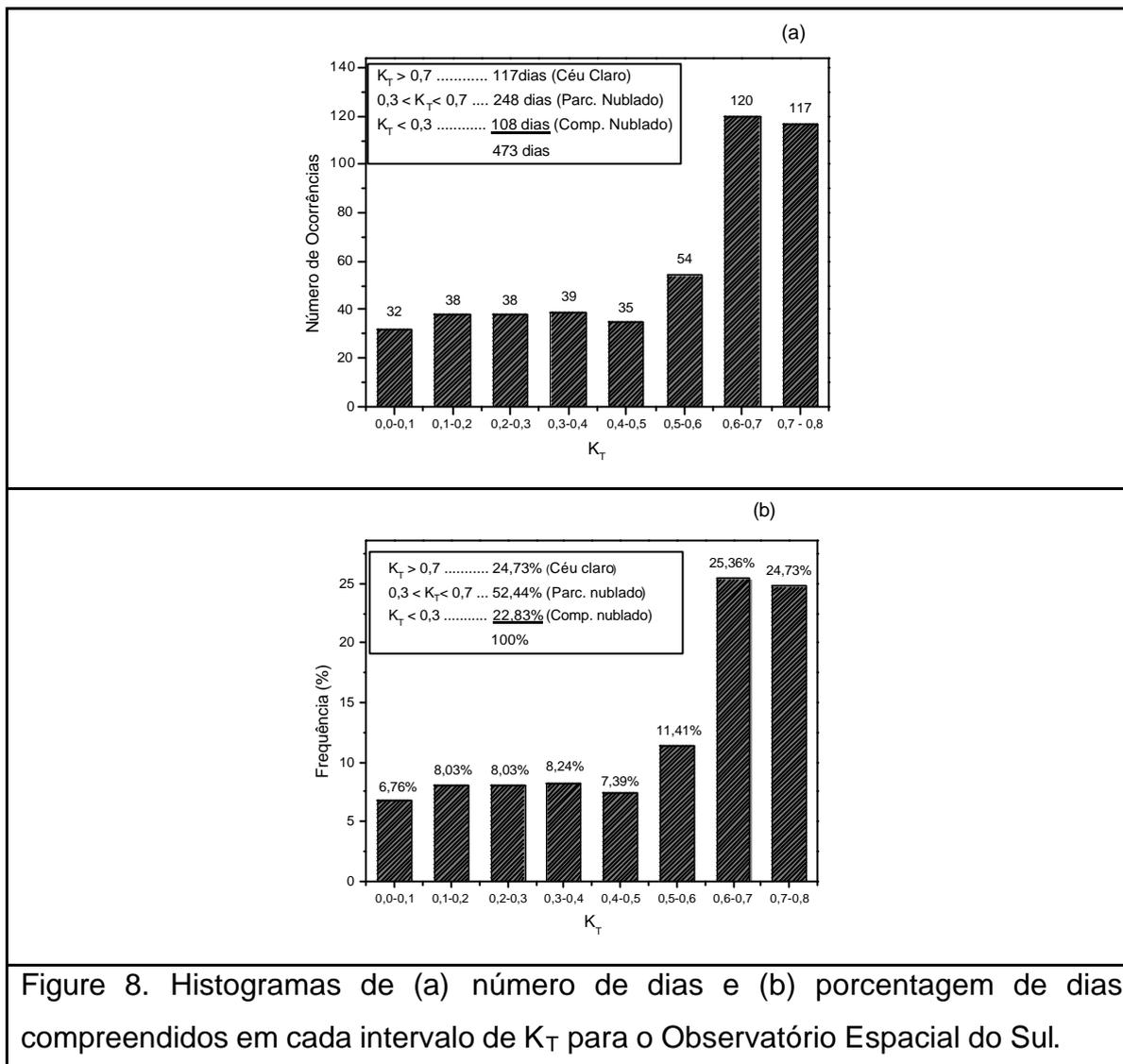


Figura 6. Dois exemplos de dias com extremos opostos de nebulosidade no mesmo dia. Para comparação é apresentada a curva de radiação global um dia de céu claro no Observatório Espacial do Sul.

O número de dias e a porcentagem de dias que ocorrem em cada faixa de valores de K_T são apresentados nos histogramas das Figuras 7(a) e 7(b), respectivamente, onde são indicados o número de dias que compreendem os intervalos de $K_T < 0,3$ (dias completamente nublados), $0,3 < K_T < 0,7$ (dias parcialmente nublados) e $K_T > 0,7$ (dias de céu claro).



CONCLUSÃO

Os resultados apresentados são preliminares, mas indicam que os modelos matemáticos das correlações de Ruth e Chant (1976) e Collares-Pereira e Rabl (1979), ajustam-se consideravelmente bem para as condições observadas na estação SONDA do Observatório Espacial do Sul. A correlação do índice de nebulosidade (K_T) com o parâmetro de radiação difusa (K_d) realizada com dados observados, apresentou comportamento semelhante àquele apresentado por Iqbal (1983). Contudo, foram observados desvios entre os dados experimentais e a literatura, especialmente para os dias de céu claro. A menor intensidade de radiação difusa observada em dias de céu claro – em relação aos valores estimados pelos modelos empíricos utilizados no estudo – pode ser devido ao fato de São Martinho da Serra estar situada em latitude menor do que

as estações utilizadas para ajuste dos modelos, bem como devido a diferenças de condições atmosféricas, poluição e aerossóis entre as regiões.

Semelhantemente ao modelo ajustado por Pereira et al. (1996), para Florianópolis (SC, Brasil) pretende-se, numa próxima etapa, desenvolver uma correlação própria para a estação do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, RS, capaz de ajustar corretamente os valores de radiação difusa para dias de céu claro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. Atlas de irradiação solar do Brasil (primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície). Brasília: INMET, Outubro, 1998.

LIU, KUO-NAN, 1980, An Introduction to Atmospheric Radiation: Academic Press, Inc., New York, 392p;

IQBAL, M., 1983, An Introduction to Solar Radiation: Academic Press Canadá , Toronto, 390p;

LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C., 1960, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation: Solar Energy, Vol. 4 (3), p1-19;

PEREIRA, Enio Bueno; ABREU, Samuel Luna de; COLLE, S. Determinação de uma Correlação para o Cálculo da Radiação Solar Difusa Incidente a partir da Radiação Solar Global. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, 11 a 14 de novembro, 1996, Florianópolis, SC. CD-ROM. Florianópolis, SC : Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1996. v. CD-ROM.

RUTH, D. W., CHANT, R. E., 1976, The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canadá: Solar Energy, Vol. 18 (2), p153-154;

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.

GUARNIERI, R. A., BIAZI, L., SCHUCH, N. J., PEREIRA, E. B., Preliminary study of global and diffuse solar radiation data from a SONDA station located in São Martinho da Serra, RS – Brazil (29.44° S, 53.82° W) In: Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2005, Salvador, BH.