

Metodologias de estimativa de cobertura de nuvens e seus resultados no modelo BRASIL-SR

Jefferson Gonçalves de Souza¹
Alice dos Santos Macedo¹
Fernando Ramos Martins¹
Enio Bueno Pereira¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Centro de Ciências do Sistema Terrestre - CCST
12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{jefferson.souza, alice.macedo, fernando.martins, enio.pereira}@inpe.br

ABSTRACT: The Cloud cover index (Ceff) obtained from satellite images contains information on cloud amount and their optical thickness. It is the chief climate data for the assessment of solar energy resources in most radiative transfer models, particularly for the model BRASIL-SR. The wide range of climate environments in Brazil turns Ceff determination into a challenging activity and great effort has been directed to develop new methods and procedures to improve the accuracy of these estimations from satellite images. This paper evaluates three tested methodologies for improving the model output BRAZIL-SR. A comparison of methods was done by comparing the measured and estimated solar irradiation by BRAZIL-SR model for the town of Petrolina in the semi-arid area of northeastern Brazil. The ground truth data was provided by the solar radiation station located at Petrolina-PE, in Brazilian Northeast region, which is part of the project SONDA. Results have shown that the new methodologies, generated coefficients of cloud effective with lower values, thus it has achieved the goal of having an image of cloud cover with values closer to the values observed in cold clouds. However, the global solar irradiation estimated by BRAZIL-SR model now provides for a systematic overestimation indicating that improvements are still necessary methods in order to identify the most reliable values of effective cloud cover from satellite images.

1.Introdução:

Atualmente, a avaliação do potencial solar como fonte de energia é uma tarefa vital para o planejamento energético dos países em desenvolvimento como o Brasil. O uso de modelos de transferência radiativa é a melhor maneira de avaliar os recursos de energia solar em grandes áreas continentais como território brasileiro.

O coeficiente de cobertura efetiva de nuvens efetivo (Ceff) é um dos principais dados sobre o clima para a avaliação de recursos de energia solar na maioria dos modelos de transferência radiativa, especialmente para o modelo BRASIL-SR. Este coeficiente é obtido a partir de imagens de satélite e contém informações sobre a quantidade de nuvens e sua espessura óptica.

Para a obtenção do coeficiente de cobertura de nuvens efetivo no BRASIL-SR, são comparadas uma imagem de satélite, no canal visível, em relação a duas imagens compostas: uma imagem de céu claro e outra imagem de céu encoberto. Os pixels com valores elevados de radiância visível medidos pelo satélite apresentam maior nebulosidade, isto é, nuvens com maior espessura óptica e/ou maior cobertura de nuvens refletem maior quantidade de radiação solar de volta para o espaço. A composição das imagens de máxima e mínima cobertura de nuvens é obtida a partir análise estatística das imagens de um mesmo horário de aquisição durante o período de um mês.

No Brasil, algumas regiões apresentam o céu completamente sem nuvens ou parcialmente nublado por um mês inteiro, tornando complexa a tarefa de composição de uma imagem de máxima cobertura de nuvens. Deste modo, o cálculo do Ceff torna-se irreal e superestimado, isto é, a Ceff obtida indicará maior cobertura do que se observa na realidade.

Da mesma forma, existem áreas no território brasileiro que apresentam cobertura de nuvens persistente em determinados horários do dia durante todo o período de um mês. Essa característica também influencia a confiabilidade dos valores utilizados para a composição da imagem representativa da mínima cobertura de nuvens de forma que os valores de C_{eff} também indicarão um valor irreal.

Obviamente, as estimativas de irradiação solar incidente no território brasileiro estão intimamente relacionadas com a qualidade dos valores de C_{eff} obtidos a partir das imagens de satélite. Visando aprimoramento dos resultados do modelo BRASIL-SR, novas metodologias para a composição da imagem de máxima e mínima cobertura de nuvens vem sendo testadas, a fim de obter estimativas de C_{eff} mais próximas do observado.

Este trabalho avalia três metodologias testadas para o melhoramento do resultado do modelo BRASIL-SR. A comparação das metodologias foi realizada por meio da comparação da irradiação solar medida e estimada pelo modelo BRASIL-SR para a localidade de Petrolina no semi-árido, área da região nordeste do Brasil.

A primeira metodologia é a técnica tradicional, aqui chamada de TRAD, na qual os pixels com máximos e mínimos valores de radiância visível medidos pelo satélite são utilizados na composição das imagens de céu encoberto e céu claro, respectivamente.

A segunda técnica, aqui chamada de GEOM, usa novamente as radiâncias visíveis de dados de satélite, mas leva em conta a geometria do Sol-Satélite-Terra para determinar os valores associados de céu encoberto. Esta metodologia assume que a máxima reflectividade da nuvem medida pelo satélite nas condições de céu completamente encoberto depende apenas dos aspectos geométricos das localizações relativas do Sol, Pixel e Satélite e não depende da localização geográfica das nuvens. A composição da imagem de céu claro é mantida como no método anterior.

A terceira técnica, chamada de NEW, utiliza os valores dos pixels no canal visível correspondente aos valores de máxima radiância no canal infravermelho para selecionar os dias de céu claro e obter radiâncias visíveis do céu sem nebulosidade. A composição da imagem de máxima nebulosidade utiliza o procedimento realizado no método GEOM.

2. Metodologia de Trabalho:

Para a realização do trabalho foram utilizadas imagens no canal visível do satélite GOES12 que são fornecidas pelo CPTEC/INPE. Os dados de radiação global observada foram fornecidos pelo projeto SONDA através do site <http://sonda.ccst.inpe.br/>. O período estudado compreende os meses de março, abril e maio do ano de 2010. Os três métodos, TRAD, GEOM e NEW, de composição de imagens de céu encoberto e claro foram testados.

2.1. Cálculo do Coeficiente de Cobertura Efetiva de Nuvens (C_{eff})

O coeficiente de cobertura efetiva de nuvens é um dado de entrada do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR para estimativa da irradiação solar incidente na superfície do planeta por meio da solução numérica da equação de transferência radiativa na atmosfera por meio da aproximação de Dois-Fluxos. O modelo BRASIL-SR foi utilizado para o desenvolvimento do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2006) que atualmente é utilizado como referência pela comunidade científica do setor de energia.

O C_{eff} é calculado através da Equação 1.

$$C_{eff} = \frac{L_r - L_{clr}}{L_{cld} - L_{clr}} \quad (1)$$

onde: L_r é o valor da radiância visível medida pelo satélite para um determinado pixel, L_{clr} é o valor da radiância visível observada pelo satélite em condições de céu claro e L_{cld} é o valor da radiância obtida em condições de céu completamente nublado. A determinação numérica do C_{eff} para cada pixel da imagem de satélite é realizada fazendo-se uso de uma imagem composta de céu claro que fornece os valores de L_{clr} e de uma imagem composta de céu encoberto que armazena os valores de L_{cld} . A seguir são descritos os 3 métodos utilizados neste trabalho para a obtenção das duas imagens compostas.

Em todas as metodologias testadas foi incluída uma máscara nos oceanos antes da determinação das imagens de máxima e mínima cobertura de nuvens, afim de que no momento do cálculo não fossem levada em conta a reflexão de porções de água, mas apenas o continente.

2.2. Descrição do método TRAD

O método TRAD é o método tradicional utilizado para produzir dados de cobertura de nuvens para alimentar o modelo BRASIL-SR. As imagens compostas de céu claro e céu completamente encoberto, em cada horário de aquisição de imagens pelo satélite, são obtidas a partir análise estatística das imagens de um mesmo horário de aquisição durante o período de um mês. Os pixels com valores elevados de radiância visível medidos pelo satélite apresentam maior nebulosidade, isto é, nuvens com maior espessura ótica e maior C_{eff} .

Este método costuma superestimar C_{eff} em relação aos valores observados. Muitas vezes em cidades como Petrolina o céu permanece completamente sem nuvens ou com pouca nebulosidade por meses inteiros, tornando a imagem de máxima cobertura de nuvens com valores de nebulosidade menores do que o real.

2.3. Descrição do método GEOM

Neste método, obtiveram-se a imagem de máxima cobertura de nuvens com base na configuração geométrica Sol-Pixel-Satélite. O maior valor de radiância medida pelo satélite para um dado valor do ângulo entre os três pontos foi armazenado em uma tabela de consulta. A imagem composta de máxima cobertura foi determinada calculando-se inicialmente a configuração geométrica para o pixel e horário da imagem. A atribuição do valor de radiância de máxima nebulosidade armazenado na tabela referente a geometria observada foi atribuída na sequência. Em resumo, a máxima radiância dentro de cada faixa de angulação Sol-Pixel-Satélite substituiu o valor máximo observado pelo satélite para um determinado pixel da imagem. Os arquivos de mínima cobertura de nuvens em cada horário de aquisição de imagens de satélite, foram calculados da maneira convencional, ou seja, os menores valores de radiância visível observados pelo satélite foram atribuídos para a imagem de céu claro.

2.4. Descrição do método NEW

Nesta metodologia obteve-se as imagens de máxima cobertura de nuvens do modo descrito para o método GEOM. As imagens de mínima radiância foram obtidas através do valor correspondente no canal visível aos máximos valores observados no canal infravermelho. Após terem sido obtidas, as imagens de mínima radiância passaram por um filtro, com o intuito de suavizar alterações bruscas de reflectividade da superfície terrestre em áreas de 3 x 3 pixels (cerca de 30 X 30 km) que poderiam estar associadas com a presença de nebulosidade.

Neste tratamento, a matriz da imagem composta de céu claro foi percorrida em pequenos blocos de três linhas por três colunas, dentro desses blocos o foram calculados a média e o desvio padrão como segue nas Equações 2 e 3.

$$\text{MÉDIA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \text{MÉDIA})^2} \quad (3)$$

Onde: R_i são os termos da amostra e n é o número de termos da amostra (9 elementos).

A composição das imagens de céu claro e encoberto foi feita a partir análise estatística das imagens de um mesmo horário de aquisição durante o período de estudo (março, abril e maio de 2010).

2.5. Análise comparativa dos métodos

Após o cálculo da cobertura de nuvens, o modelo BRASIL-SR foi executado três vezes, uma para cada método. A radiação solar global estimada pelo modelo foi confrontada com a radiação global observada na estação SONDA localizada em Petrolina/PE a fim de comparar a influência das 3 metodologias na precisão das estimativas de irradiação solar.

A radiação global estimada e observada também foram confrontadas levando em conta médias. No caso da radiação global estimada, média levou em conta os oito pixels localizados ao redor de Petrolina além da própria cidade, totalizando uma média de nove pontos.

Para a radiação global observada foi feita a média dos valores observados nos sete minutos anteriores, posteriores além do minuto da observação, sem do assim foi feita uma média de quinze valores observados.

Os resultados foram plotados em diagramas de dispersão a fim de comparar todos os tratamentos. Também foram calculados o VIÉS e o RMSE como segue na Equação 4 e Equação 5, respectivamente abaixo.

$$\text{VIÉS} = \frac{\sum_i^n (R_{\text{estimado},i} - R_{\text{medido},i})}{R_{\text{medido},i}} \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \frac{\sqrt{\sum_i^n (R_{\text{estimado},i} - R_{\text{medido},i})^2}}{\sum_i^n R_{\text{medido},i}} \quad (5)$$

3 – Resultados e Discussão.

Na Figura 1, o valor do coeficiente efetivo de cobertura de nuvens, mostrado no eixo vertical do gráfico varia entre 0 (zero) para céu claro, e 1 para céu totalmente nublado. Observou-se que o Ceff mostrou valores menores nos novos métodos (GEOM e NEW) quando comparados com o método TRAD. Na Figura 1(c) mostra que o método NEW indicou céu completamente sem nuvens a partir do dia 13 até o restante do mês, diferentemente dos métodos que acusavam céu parcialmente nublado.

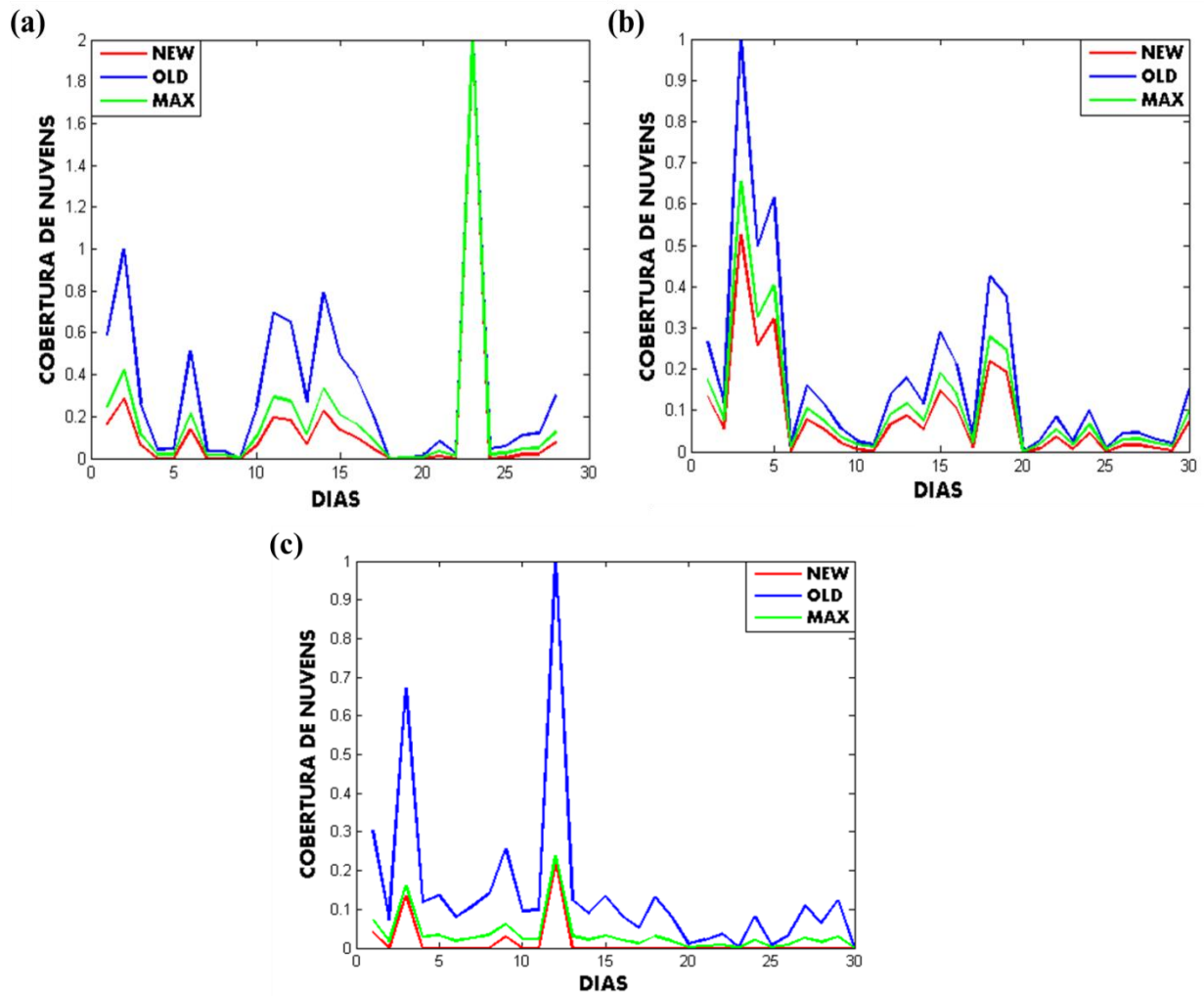


Figura 1. Cobertura de nuvens em Petrolina nos métodos TRAD, GEOM e NEW (a) 10:00 UTC, (b) 15:00 UTC, (c) 18:00 UTC.

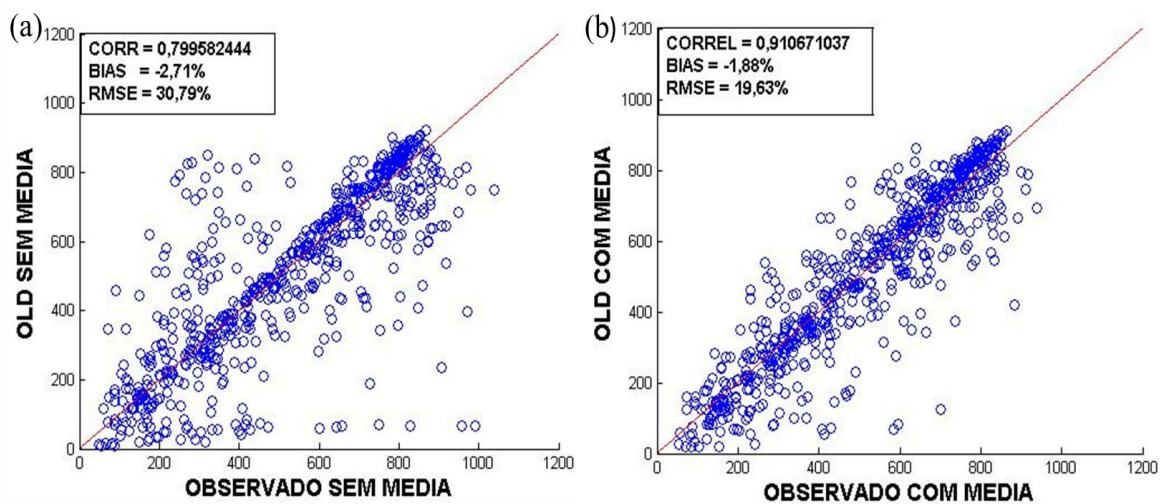


Figura 2. (a) Diagrama de dispersão da radiação global TRAD X Observado sem média, (b) idem porém utilizando valores médios espacial e temporal. Ambos em W/m².

Pode-se observar na Figura 2(a) que correlação entre os dados de irradiação solar global estimado e observado pelo método TRAD foi de 0,79. O VIÉS com valor de -2,71% denotava subestimação do modelo em relação ao observado. Com a inclusão de médias nos cálculos da radiação global estimada e observada observou-se menor espalhamento dos pontos no teste de dispersão, Figura 2(b), a correlação dos pontos subiu para 0,91, o VIÉS foi -1,88% denotando menor subestimação em relação a Figura 2(a). O RMSE diminuiu entre as Figura 2(a) e 2(b) mostrando que o erro médio entre os valores estimados também diminuiu.

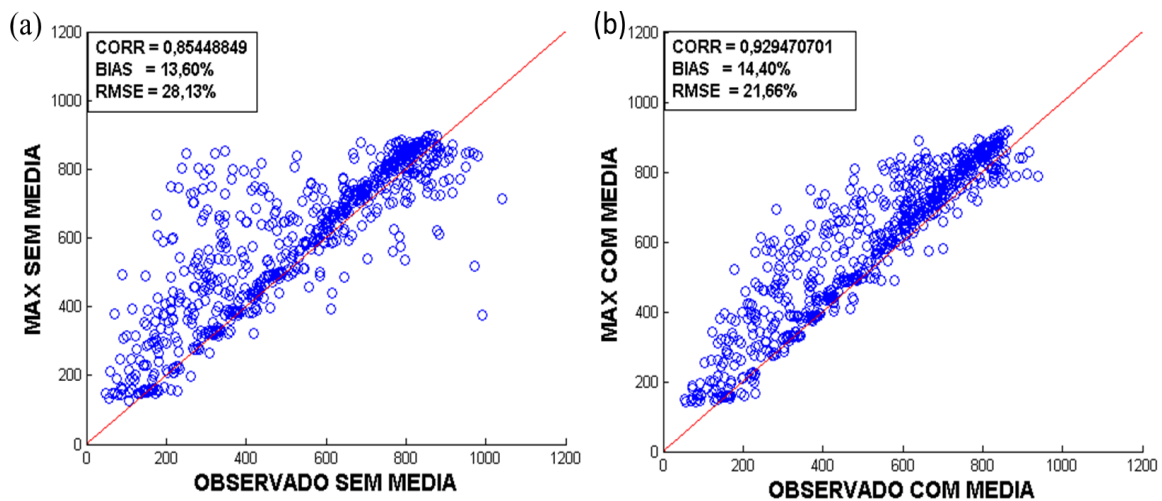


Figura 3. (a) Diagrama de dispersão da radiação global GEOM X Observado, (b) idem mas utilizando valores médios espacial e temporal. Ambos em W/m^2 .

Com a inclusão do método GEOM a radiação global estimada pelo modelo passou a basicamente a superestimar a irradiação solar observada, mas ainda notam-se pontos de subestimativa. A correlação, no método GEOM passou a ser 0,854 e o VIÉS indica superestimativa de 13,60% e o RMSE mostra o erro médio quadrático de 28,1%. Quando médias espaciais dos valores estimados são comparados com médias temporais dos valores observados, a correlação passou a ser 0,929, o VIÉS encontrado foi 14,4%, e o RMSE foi reduzido para 22,7% da média mensal de irradiação solar incidente em Petrolina.

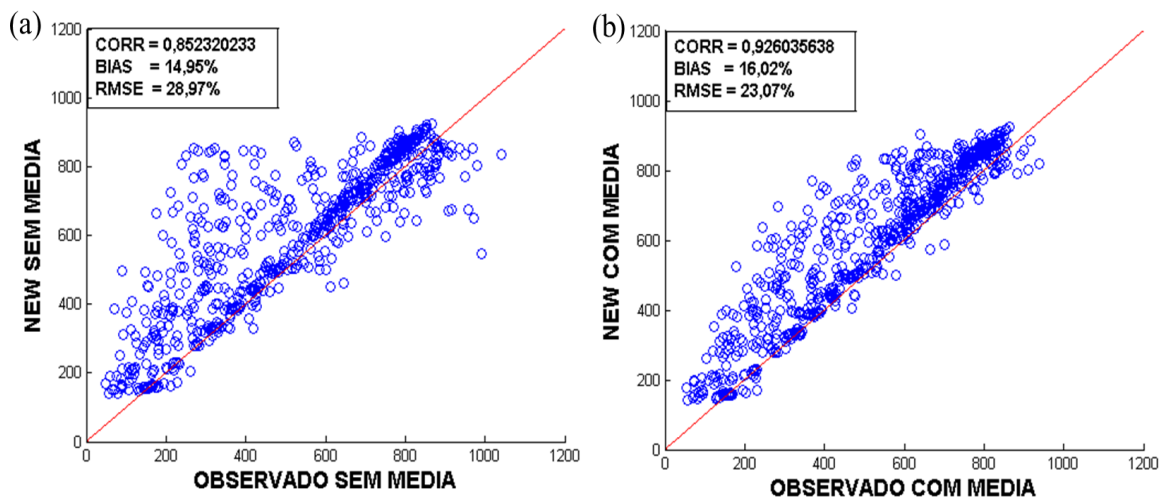


Figura 4 – (a) Diagrama de dispersão da radiação global New X Observado, (b) idem mas utilizando valores médios espacial e temporal. Ambos em W/m^2 .

No método NEW, representado na Figura 4(a) observou-se correlação de 0,852, o VIÉS foi 15% e o RMSE foi 29% do valor médio mensal da irradiação solar. Realizando as médias espaciais e temporal nota-se, na Figura 3(b), que a correlação passou a ser de 0,926, o VIÉS sofreu leve elevação, atingindo 16%, mas o RMSE diminuiu passando a apresentar valor de 23%.

4 – Conclusões:

O estudo mostrou que as metodologias GEOM e NEW testadas, geraram coeficientes de cobertura de nuvens efetivo com valores mais baixos, deste modo atingiu-se o objetivo de ter uma imagem de cobertura de nuvens com valores mais próximos dos valores observados em locais de baixa nebulosidade. No entanto, a irradiação solar global estimada pelo modelo BRASIL-SR passou a apresentar uma superestimativa sistemática indicando que ainda são necessários aperfeiçoamentos dos métodos no intuito de identificar os valores mais confiáveis de cobertura efetiva de nuvens a partir das imagens de satélite.

A metodologias propostas para substituir a metodologia TRAD apresentaram melhoras na correlação dos dados de radiação global estimada e observada. Observou-se que os quando a média espacial é aplicada às estimativas numéricas e a média espacial é aplicada ao valores obtidos na superfície, os desvios observados entre estimativas e observações são menores indicando que fatores espaciais e temporais são importantes quando se compara valores obtidos a partir de dados de satélite e de dados coletados em superfície.

Agradecimentos:

Os autores agradecem ao CNPq (processos 555764/2010-9) pelo apoio a esta pesquisa e ao projeto SONDA por disponibilizar os dados de irradiação solar na superfície. Agradecimentos a equipe do DSA pelo suporte e disponibilização das imagens de satélite também são devidos.

Referencias Bibliográficas:

Martins, F. R. **Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR**. 2001. Tese de Doutorado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos.

Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Rüther, R. 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.