

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR
POR SATÉLITES PARA O BRASIL

Elisabete Caria Moraes
Fausto Carlos de Almeida

Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
12200 - São José dos Campos, SP - Brasil

RESUMO

A baixa densidade da rede solarimétrica brasileira, associada ao aprimoramento da extração de informações da radiação solar incidente na superfície com a utilização dos produtos fornecidos pelos satélites meteorológicos geoestacionários, motivou o estudo e a aplicação de metodologias de estimativa de radiação solar utilizando o satélite geoestacionário GOES no Brasil. Os dados de verdade terrestre foram coletados nos experimentos de fevereiro de 1984 e abril-maio de 1985 realizados em São José dos Campos, SP e de junho e agosto de 1986 realizado em Cachoeira Paulista, SP. Foram feitas comparações entre a radiação solar estimada através de imagens do canal visível do satélite, com os dados de verdade terrestre. A análise comprovou a aplicabilidade do modelo, que apresentou erro relativo médio diário de 14% na estimativa da radiação solar para situações de céu limpo e com cirrus, e de 35% para situação de céu encoberto. Entretanto, para a análise instantânea verificou-se, que os maiores erros ocorrem à tarde (praticamente o dobro da manhã) e que é inviável a utilização de imagens digitais no canal visível do satélite GOES para ângulo solar zenital maior que 60° . O modelo foi também comparado com métodos convencionais e mostrou ser o mais propício e adequado para o ano particular do Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Antes do advento dos satélites meteorológicos, os registros da radiação solar incidente na superfície terrestre eram obtidas somente através de medidas diretas (piranômetros) ou estimadas através de parâmetros:

meteorológicos convencionais. A baixa densidade da rede solarimétrica brasileira, associada com a extração de informações da radiação solar incidente na superfície através da utilização dos produtos fornecidos pelos satélites meteorológicos (Almeida et alii, 1987), motivou o estudo e a aplicação de metodologias que estimem a radiação solar utilizando o satélite meteorológico geoestacionário GOES para o Brasil.

Arai e Almeida (1982, 1985), baseados no modelo físico de transferência radiativa (Gautier et alii, 1980), estimaram a radiação solar instantânea incidente na superfície para alguns horários preestabelecidos. Utilizaram-se de algumas imagens do canal visível do satélite GOES-5 e do sistema de "navegação" implementado por Conforte et alii (1983), necessário para a transformação de coordenadas de imagens (linha e elemento ("pixel")) em coordenadas geográficas (latitude e longitude). Nesses trabalhos verificaram-se a viabilidade da gravação, navegação, setorização e processamento de imagens de satélite no canal visível. E, que as diferenças existentes entre os oito sensores, que compõem uma varredura na imagem visível não provocam mudanças significativas nos resultados da radiação solar estimada.

O principal objetivo deste trabalho consiste em comparar, com os dados de verdade terrestre, a radiação solar instantânea e o total diário, incidente na superfície terrestre estimada através da utilização de imagens do canal visível do satélite geoestacionário GOES.

2. METODOLOGIA

As estimativas da radiação solar instantâneas foram obtidas através do modelo físico implementado no INPE por Arai e Almeida (1985). O modelo considera os efeitos do espalhamento de Rayleigh, absorção pelo vapor d'água, e a absorção e albedo das nuvens. A radiação solar incidente é considerada isotrópica e a absorção por nuvens varia até 20% (nuvens muito densas). A absorção pelo vapor d'água é obtida através da formulação de Paltridge (1973) que utiliza como variável o conteúdo de água precipitável na atmosfera, o qual foi determinado pela formulação de Smith (1966), implementada para o Hemisfério Sul por Viswanadham (1981). Arai e Almeida

(1982) verificaram a validade desta formulação, que possui como variável de entrada a temperatura do ponto de orvalho.

Os experimentos para coleta dos dados foram realizados em fevereiro de 1984, abril-maio de 1985, junho e agosto de 1986, sendo que os dois primeiros foram montados em São José dos Campos (SP) e os outros em Cachoeira Paulista (SP). No primeiro experimento, a coleta de dados de radiação solar na faixa global e na faixa espectral próxima a do satélite (0,525 - 0,71 μ m) foi obtida manualmente a cada 15 minutos e utilizando-se somente um piranômetro e três filtros (WG7, OG1 e RG8). Nos outros experimentos, a coleta da radiação solar incidente fora obtida com a utilização de três piranômetros espectrais acoplados a um sistema automático de aquisição de dados (EMA), onde os registros dos dados eram feitos a cada minuto. Na análise dos dados do experimento realizado em abril e maio de 1985 verificou-se erros no registro de um dos piranômetros que fornecia a radiação próxima à faixa do satélite. E a comparação da radiação solar estimada por satélite, para este caso, foi feita convertendo-se a radiação solar global para a radiação solar na faixa do satélite. Foi utilizado um fator de correção determinado para o topo da atmosfera, o qual acarretou uma pequena subestimativa dos dados considerados como verdade terrestre.

As imagens digitais do satélite nos experimentos de 1985 e 1986 foram gravados, no INPE/Cachoeira Paulista, a cada trinta minutos, exceto nos horários sinóticos. No primeiro experimento apenas as imagens digitais de um dia não apresentaram problemas de ruído na gravação.

Os dados de temperatura do ponto de orvalho, obtidos indiretamente através do psicrômetro de Aspersão de Assman, foram coletados manualmente em todos os experimentos.

3. RESULTADOS

As análises das estimativas instantâneas evidenciaram a aplicabilidade deste método, sendo este restrito para as análises de imagens de satélite com ângulos solares zenitais maiores do que 60°. Verificou-se uma superestimativa dos resultados quando comparados com os dados de verdade terrestre, sendo esta diferença mais acentuada para casos com nuvens,

principalmente quando a cobertura de nuvens possui características óticas diferentes na trajetória da radiação solar incidente no piranômetro e na trajetória da radiação refletida para o satélite (cones de observação).

A Tabela 1 mostra o erro relativo instantâneo e médio diário para um dia de céu limpo. Neste dia foi encontrado um erro relativo médio de 12,75%, como também uma maior superestimativa na parte da tarde.

TABELA 1

ESTIMATIVA INSTANTÂNEA DA RADIAÇÃO SOLAR NA FAIXA ESPECTRAL DO CANAL VISÍVEL DO SATÉLITE GOES (0,55-0,75 μ m), PARA UM DIA DE CÉU LIMPO (DIA JULIANO 126/1985)

HOPAS TMG	RADIAÇÃO SOLAR'		ERRO RELATIVO (E-R)/R (%)
	ESTIMADA (E) (Wm ⁻²)	REGISTRADA (R) (Wm ⁻²)	
13:00	168,06	156,90	7,11
13:30	182,00	168,76	7,85
14:00	193,16	179,91	7,36
14:30	200,83	188,28	6,67
15:00	203,62	182,00	11,88
15:30	202,23	179,91	12,41
16:00	196,65	170,15	15,58
16:30	186,89	154,81	20,72
17:00	173,64	138,77	25,13

ERRO RELATIVO MÉDIO

PERÍODO TMG	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)	VARIÂNCIA (σ)
13 ÀS 17:00	12,75	43,44
MANHÃ 13 ÀS 14:30	7,25	0,24
TARDE 15 ÀS 17:00	17,14	32,28

Esta superestimativa ficou evidenciada na análise instantânea realizada em situações de céu limpo para os experimentos de São José dos Campos. Foram verificados que os erros relativos na parte da tarde eram praticamente o dobro da parte da manhã, como pode ser visto na Figura 1. Isto ocorreu provavelmente devido à grande atividade industrial da região, pois a análise de variáveis indicou, para a situação do céu limpo, que o espalhamento por aerossóis é o principal atenuador da radiação.

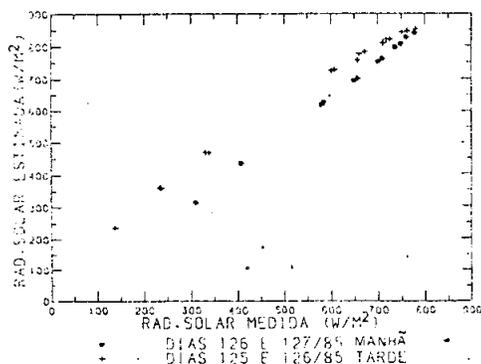


Fig. 1 - Radiação solar estimada pelo satélite versus a medida por piranômetro.

- * parte da manhã (dias julianos 126 e 127)
- + parte da tarde (dias julianos 125 e 126).

A análise da estimativa da radiação solar diária para o experimento realizado em abril e maio de 1985 pode ser visualizada na Tabela 2. Verificou-se um erro relativo médio de 13,73% para situação de céu limpo e com cirrus e um erro relativo médio de 34,63% para situações com cobertura de nuvens variáveis.

O alto erro relativo obtido para situações de céu encoberto deve-se ao fato de que, para cobertura não uniformes, a radiação solar percebida pelo piranômetro e pelo satélite podem não estar sofrendo atenuações devido ao mesmo tipo de nuvem, e portanto, o caminho óptico que a radiação solar tem que percorrer antes de ser registrada é distinto.

TABELA 2

RADIACÃO SOLAR DIÁRIA NA FAIXA DO SATÉLITE EXCLUINDO HORÁRIOS ONDE $\theta > 60^\circ$

DIA JULIANO	INDIRETO VIA SATÉLITE (IS) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	REGISTRADA (R) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	ERRO RELATIVO (IS-R)/R (%)
118***	16,356	14,466	13,06
119**	49,733	41,809	18,95
120*	4,027	2,592	38,77
124**	45,871	36,420	28,70
125**	46,510	33,524	38,83
126	53,469	47,007	13,75
127	52,311	46,495	12,51
128***	29,297	25,344	15,60
129*	25,492	17,238	47,88

- * situação com cobertura de nuvens durante o dia.
 ** período com cobertura de nuvens.
 *** não haviam imagens com $\theta > 60^\circ$.

Foi realizada, para o experimento de abril e maio de 1985, uma comparação entre a radiação solar global diária estimada através da utilização de imagens de satélite com a radiação solar estimada por métodos usuais, ou seja, modelo de Bennett (1965), que utiliza o número de horas de brilho solar, e os modelos de Brooks (1959) e Archer (1964), que utilizam parâmetros meteorológicos convencionais, denominados por Moraes (1986) de métodos semidireto e indireto convencional, respectivamente, e dados de verdade terrestre. Esta comparação é apresentada na Figura 2, onde pode ser verificado que as melhores estimativas, em relação aos dados de verdade terrestre, são as do método indireto convencional. Isto se deve ao ajuste de uma de suas variáveis (parâmetro de poeira) aos dados de radiação solar e este método se restringe somente a situação de céu limpo e a regiões com coleta regulares de parâmetros meteorológicos.

O método semidireto apresentou uma variância relativamente alta para análise diária, devida a suposição inicial do que os coeficientes

médios mensais obtidos por Bennett (1965) eram representativo para os dias dos respectivos meses. Um outro fator que influi neste resultado é a não consideração de pesos no brilho solar na formulação diária, pois o número de horas de brilho solar não retrata a intensidade da radiação solar global incidente na superfície.

Uma análise mais detalhada destes métodos pode ser encontrada nos trabalhos de Moraes (1986) e Moraes e Almeida (1987).

O modelo físico, que utiliza imagens do canal visível do satélite GOES, denominado aqui de método indireto via satélite, superestimou os resultados em torno de 14%. Na realidade, este erro deve ser menor, pois foi utilizado um fator de conversão obtida no topo da atmosfera, que transforma a radiação solar da faixa espectral para a faixa global. Esta conversão causou uma superestimativa da radiação solar obtida através de imagens digitais.

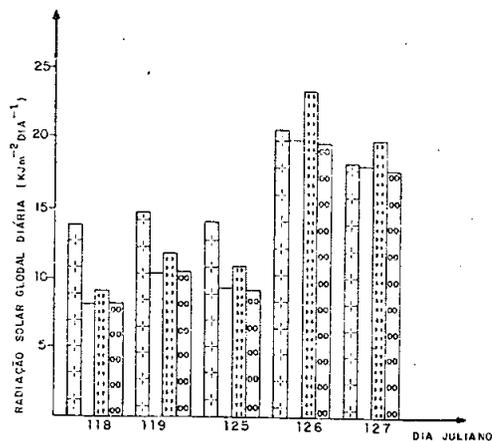


Fig. 2 - Radiação solar global integrada durante o dia (áreas parciais).

- ▨ - Método semidireto
- - Método indireto convencional
- ▤ - Método indireto via satélite
- ▩ - Método direto

4. CONCLUSÕES

Os resultados encontrados na avaliação da radiação solar incidente na superfície estimada através de imagens digitais do satélite geostacionário GOES, utilizando o modelo físico de Gautier et alii (1980), tem se mostrado um método promissor.

O método indireto via satélite apresentou bons resultados, instantâneo e total diário, nas estimativas da radiação solar para céu limpo e céu com nuvens cirrus, sendo que para situações de céu com cobertura variável, os erros encontrados foram maiores. Esforços têm sido aplicados na análise de situações com nuvens, com o intuito de melhorar as estimativas de radiação solar. Estudos preliminares, feitos por Moraes et alii (1987), mostraram a possibilidade de se obter uma relação entre atenuação de nuvens (absorção e albedo) e "count" visível (valor do brilho refletido para o satélite) normalizado. Isto possibilitaria uma melhor caracterização de nuvem e portanto uma melhor estimativa da radiação solar.

Um outro fator que tem sido estudado é a obtenção de um fator que possibilite a conversão da radiação solar na faixa do satélite (0,55 - 0,75 μ m) para a faixa do espectro global, determinado a partir de dados de superfície. Na análise dos resultados para o experimento de abril e maio de 1985, este fator de conversão foi obtido para o topo da atmosfera. Isto implicou numa superestimativa da radiação solar global estimada por satélite e conseqüentemente num erro relativo maior (em relação aos dados de verdade terrestre).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.C.; MORAES, E.C.; ARAI, N. *O satélite e seu potencial como instrumento de observação da radiação solar para fins agrometeorológicos*. São José dos Campos, INPE, 1987. (no prelo).
- ARAI, N.; ALMEIDA, F.C. *Estimativa da radiação solar que chega à superfície terrestre utilizando satélite meteorológico*. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2567-PRE/215).

———. *Estimativa da radiação solar instantânea por satélite para céu claro ou encoberto*. São José dos Campos, INPE, 1985. (INPE-3390-PRE/661).

ARCHER, C.B. The relationship between radiation and solar altitude in Southern Africa. *Notos*, 13:21-24, 1964.

BENNETT, I. Monthly maps of mean daily insolation for the United States. *Solar Energy*, 9(3):145-152, Mar., 1965.

BROOKS, F.A. *An introduction to physical microclimatology*. Davis, University of California, 1959.

CONFORTE, J.C.; ARAI, N.; ALMEIDA, F.C. *Navegação das imagens dos satélites meteorológicos geoestacionários*. São José dos Campos, INPE, 1983. (INPE-2772-RPE/435).

GAUTIER, C.; DIAK, G.R.; MASSE, S. A simple physical model to estimate incidente solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 19(8):1005-1012, Aug., 1980.

MORAES, E.C. *Comparação entre métodos de estimativa da radiação solar: satélite e convencional*. São José dos Campos, INPE, 1986. (INPE-4025-TDL/242).

MORAES, E.C.; ALMEIDA, F.C. Uma avaliação dos métodos convencionais simples para a estimativa da radiação solar global incidente na superfície. São José dos Campos, INPE, 1987. (no prelo)

MORAES, E.C.; ARAI, N.; ALMEIDA, F.C. Avaliação da atenuação de nuvens na estimativa da radiação solar incidente na superfície terrestre através de satélite geoestacionário. São José dos Campos, INPE, 1987. (no prelo)

PALTRIDGE, G.W. Direct measurement of water vapor absorption of solar radiation in the free atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30(1):156-160, Jan., 1973.

SMITH, W.L. Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point. *Journal of the Applied Meteorology*, 5(5):726-727, May, 1966.

VISWANADHAM, Y. The relationship between total precipitable water and surface dew point. *Journal of the Applied Meteorology*, 20(1):1-8, Jan, 1981.