

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR QUE CHEGA À SUPERFÍCIE TERRESTRE UTILIZANDO SATÉLITE METEOROLÓGICO

NELSON ARAI
FAUSTO CARLOS DE ALMEIDA

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO
- CNPq -
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP

RESUMO

Utilizando as imagens obtidas pelo canal visível do Satélite Meteorológico GOES-5, transmitidas de 30 em 30 minutos com uma resolução espacial de 1 quilômetro, num modelo de transferência radiativa na atmosfera terrestre, estima-se a radiação que chega à superfície terrestre. Neste trabalho apresenta-se um modelo que incorpora os efeitos de atenuações devidos ao espalhamento de Rayleigh e à absorção pelo vapor d'água. Este último é parametrizado através do valor da temperatura de ponto de orvalho observada na superfície. Os valores da radiação solar que chegam à superfície, obtidos através desta metodologia, são comparados com os dados de "verdade terrestre" obtidos em piranômetros. Apresentam-se também comparações entre os valores obtidos utilizando-se a espessura da camada integrada do vapor d'água determinada através do método de Smith e os valores observados em medidas de campo com radiossonagens.

1 - INTRODUÇÃO

A radiação solar que chega à superfície é um parâmetro de grande utilidade no estudo do aproveitamento da energia solar como fonte alternativa, na agricultura e na climatologia.

O método convencional usado para a estimativa da radiação solar incidente na superfície consiste na utilização dos dados obtidos em piranômetros. O inconveniente deste método é apresentar pequena resolução espacial, devido à dificuldade em ter uma rede solarimétrica suficientemente densa e a problemas físicos (regiões de difícil acesso) e técnico/econômicos (número de piranômetros). Esta limitação foi minimizada com o advento dos satélites meteorológicos geoestacionários que permitem

este tipo de estimativa e oferecem alta resolução temporal (imagens a cada 30 minutos) e espacial (cerca de 1 quilômetro no ponto subsatélite) na faixa correspondente ao visível no espectro eletromagnético.

Os primeiros trabalhos visando a utilização mais efetiva das imagens de satélite, neste tipo de aplicação, foram desenvolvidos por Vonder Haar e Ellis (1978), usando um satélite de órbita polar da série NOAA. Posteriormente, Tarplay (1979) aplicou um outro tipo de enfoque, usando técnicas estatísticas em dados obtidos por satélite geostacionário. Recentemente, Gautier et alii (1980) obtiveram excelentes resultados com um modelo físico e dados obtidos do satélite geostacionário da série GOES.

O presente trabalho baseia-se no modelo desenvolvido por Gautier et alii (1980), por parecer o mais promissor e de utilização mais geral. Neste modelo físico a radiação solar incidente é estimada através de medidas de brilho, tomadas pelo satélite GOES em condições de céu claro. No processo de troca de energia, leva-se em conta a absorção da radiação pelo vapor d'água atmosférico e o espalhamento Rayleigh. Um aspecto relevante neste modelo é a necessidade de uma "navegação" das imagens, tendo em vista que o satélite não é completamente estacionário, e de uma "calibração" dos sensores do radiômetro, devido à sua deteriorização com o decorrer do tempo.

2 - MODELO PARA CÉU SEM NUVENS

A energia radiante ascendente que o satélite recebe é função da energia incidente no topo da atmosfera e do albedo planetário (Terra-atmosfera). Para calcular a radiação que chega à superfície terrestre, é necessário estimar o aumento ou a diminuição de energia devido à atmosfera e à superfície. Os processos que são levados em conta no modelo e que determinam a intensidade do fluxo radiante de onda curta, medido pelos sensores do satélite, são apresentados na Figura 1.

A equação desse fluxo radiante pode ser escrita na forma (Gautier et alii, 1980):

$$OC\uparrow = F_0\alpha + F_0(1-\alpha) [1-a(u_1)] [1-a(u_2)] (1-\alpha_1) \cdot A, \quad (1)$$

onde:

$OC \uparrow$ - fluxo radiante ascendente de onda curta, percebido pelo satélite ($W.m^{-2}$);

F_0 - fluxo solar radiante instantâneo de onda curta no topo da atmosfera ($W.m^{-2}$);

α - coeficiente de reflexão para o feixe de radiação direta (adimensional);

α_1 - coeficiente de reflexão para a radiação difusa (adimensional);

$a(u_1) a(u_2)$ - coeficiente de absorção para a trajetória da radiação no vapor d'água: u_1 para o ângulo solar e u_2 para o ângulo do satélite (adimensional);

A - albedo da superfície (adimensional).

Os coeficientes de reflexão: α como função do ângulo zenital do sol (θ), e α_1 para radiação difusa de onda curta, podem ser obtidos através da metodologia sugerido por Coulson (1959). O espalhamento da radiação pelo solo é suposto isotrópico.

Na ausência de nuvens, o fator determinante na absorção da radiação de onda curta é a espessura da camada integrada do vapor d'água atmosférico (u). Paltridge (1973), utilizando uma formulação proposta por Yamamoto (1962), derivou uma fórmula analítica para absorção da radiação pelo vapor d'água. Esta espessura é parametrizada em função da temperatura de ponto de orvalho à superfície (T_d) e de uma constante (λ) que depende da latitude e da estação do ano. Esta constante foi determinada através de um método originalmente proposto por Smith (1966) e aplicado ao Hemisfério Sul por Viswanadham (1981).

O albedo à superfície pode ser calculado por:

$$A = \frac{OC \uparrow - F_0 \alpha}{F_0 (1-\alpha) [1-a(u_1)] [1-a(u_2)] (1-\alpha_1)} \quad (2)$$

Aqui, a onda curta ascendente pode ser obtida diretamente dos dados de refletância (R) observados pelo satélite.

A radiação de onda curta incidente na superfície é dada por:

$$OC\downarrow = F_0 (1-\alpha) [1-a(u_1)] (1+A\alpha_1). \quad (3)$$

Finalmente, a energia líquida de onda curta armazenada na superfície é dada por:

$$OCL = F_0 (1-\alpha) [1-a(u_1)] [1-A(1-\alpha_1) - A^2\alpha_1]. \quad (4)$$

Caso haja nuvens, deve ser levado em conta que os processos descritos para céu sem nuvens podem ocorrer acima e abaixo delas e que, além disso, existe a absorção e o espalhamento pelas próprias nuvens.

3 - REFLETÂNCIA

Para a obtenção dos valores de refletância (R) para um ponto, é necessária a determinação do valor (CT) do "count" (número fornecido pelo satélite, que no espectro visível varia entre 0 e 63), que por sua vez necessita de um sistema preciso de "navegação" e "calibração". O processo de "navegação" consiste na determinação precisa de um ponto do sistema de coordenadas terrestres (latitude, longitude) em coordenadas da imagem (linha, elementos). Isto se faz necessário devido ao fato do satélite não ser completamente estacionário. Uma metodologia para este tipo de aplicação foi implementada por Conforte et alii (1982).

Faz-se a "calibração" dos 8 sensores do canal visível do satélite usando um procedimento sugerido por Norton et alii (1980), para compensar os efeitos da deteiorização desigual com o tempo dos sensores do radiômetro.

A refletância (R) pode então ser obtida através de uma relação do tipo:

$$R = C_1 (CT^2 - C_2), \quad (5)$$

onde C_1 e C_2 são constantes determinadas pelo processo de calibração dos sensores. Para sensores "perfeitos", C_1 é 1/3969 e C_2 é igual a zero.

4 - RESULTADOS

São apresentados a seguir resultados preliminares obtidos durante um experimento realizado em Bauru-São Paulo pela Fundação Educacional de Bauru em conjunto com a Universidade de São Paulo e o Instituto de Pesquisas Espaciais, no período de 24 a 31 de julho de 1982. A área escolhida para o estudo tem cerca de 80 quilômetros na direção sul-norte, e 20 quilômetros na direção oeste-este, com um piranômetro localizado no centro desta área (latitude de $22^{\circ} 21' 30''$ S e longitude de $49^{\circ} 01' 38''$ W). Por se tratar de um dia com ausência quase total de nuvens, como pode ser visto na Figura 2, foi escolhido o dia 26 para a aplicação da metodologia proposta. Neste dia foram feitas gravações de imagens de satélite às 09:30 e 15:30 horas (local), com observações de piranômetro e radiossondagens em horários próximos.

Para que se possa fazer uma comparação entre os dados obtidos por satélites e os obtidos por piranômetros, é necessário uma homogeneidade dos dados, além de se levar em conta os erros inerentes a cada tipo de observação. Inicialmente deve-se considerar que as faixas de comprimento de onda da resposta dos instrumentos são diferentes, ou seja: o radiômetro do satélite é sensível a comprimentos de onda entre $0,55$ e $0,75 \mu\text{m}$, enquanto o piranômetro com filtros específicos, a comprimentos de onda entre $0,525$ e $0,710 \mu\text{m}$. Em termos de quantidade de radiação medida, se fossem colocados no topo da atmosfera um piranômetro e um radiômetro (do tipo usado no GOES-5), o primeiro mediria cerca de 22.9% do total de radiação solar incidente e o segundo cerca de 23.2%.

Nos dados de imagens digitalizadas obtidas por satélites foram aplicadas, além do processo de navegação, três tipos de correção: a) correção para a faixa de sensibilidade do comprimento de onda do radiômetro; b) correção para a deteriorização dos sensores do radiômetro e c) correção da parametrização da espessura integrada do vapor d'água (u). Estas correções foram introduzidas na metodologia em quatro casos diferentes para cada aplicação do modelo, como mostra a Tabela 1.

Os resultados da introdução destas correções podem ser vistos na Tabela 2 para cada situação estudada.

Os resultados preliminares demonstraram que a correção para a faixa específica de resposta do radiômetro é realmente necessária. A correção para a deteriorização dos sensores não provocou alterações significativas nos resultados, talvez devido ao fato do GOES-5 ser um satélite de utilização mais ou menos recente, embora se faça necessário um conhecimento mais detalhado da função de transformação-intensidade de sinal para "count". A correção para a formulação da camada integrada do vapor d'água demonstrou boa aproximação quando comparada com valores obtidos em radiossondagens; este fato, aparentemente, sugere que a formulação proposta por Smith (1966) é uma boa aproximação para o comportamento deste parâmetro.

Cabe ressaltar ainda que na observação das 09:45 horas (local) houve problema técnico no lançamento da radiossonda, fazendo com que os dados deste horário fossem aproximados, usando dados de radiossondagem das 11:55 horas (local), o que deve ser levado em conta na discrepância entre os dados de piranômetro e os de satélite neste horário. Além da aplicação dessas correções, devem-se citar outras fontes de erro que não foram consideradas, tais como: limitações do próprio modelo físico, que considera como fatores responsáveis pela atenuação da radiação de onda curta somente o espalhamento de Rayleigh e a absorção pelo vapor d'água, e os erros inerentes ao próprio piranômetro e ao satélite.

Foram obtidos também para estes horários nos 4 casos estudados, valores de albedo medidos pelo satélite que se situaram entre 4 e 8%, compatíveis com o tipo de cobertura vegetal predominante na região.

5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho fica demonstrada a viabilidade de se gravar, "navegar", "calibrar", setorizar e processar uma imagem de satélite, obtendo-se como resultado final a quantidade de radiação solar recebida em um ponto da superfície da Terra com boa resolução espacial e temporal. A utilidade desta técnica se acentua quando há necessidade de determinação deste parâmetro em áreas continentais de difícil acesso e em regiões oceânicas.

A próxima etapa no desenvolvimento do trabalho será a integração no tempo dessas estimativas instantâneas, para se obter os valores diários e a introdução da atenuação devida à presença de nuvens, com vistas a um modelo geral.

Deve-se ressaltar também que este é um trabalho preliminar, o qual utiliza um modelo físico que pode ser implementado com outros fatores, os quais afetam a quantidade de radiação solar que chega à superfície, tais como a presença de aerossóis e outros gases. Além disso, faz-se necessário um conhecimento mais acurado do processo de espalhamento de Rayleigh, absorção pelo vapor d'água e comportamento dos diversos sensores do satélite para uma determinação mais precisa da radiação de onda curta que chega à superfície terrestre.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração do Engenheiro Luis Fernando Solis Munõz na formatação e leitura das imagens digitais gravadas e a todos que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração do presente trabalho.

Este trabalho foi em parte financiado pelo convênio CNPq/INPE/FINEP B/54-81/042/00/00.

BIBLIOGRAFIA

- CONFORTE, J.C.; ARAI, N.; ALMEIDA, F.C. Navegação das imagens dos satélites meteorológicos geostacionários. S.J. Campos - INPE, (no prelo).
- COULSON, K.L. Characteristics of the radiation emerging from the top of a Rayleigh atmosphere, 1 and 2. Planetary Space Sciences, 1(4): 265-284, April 1959.
- GAUTIER, C.; DIAK, G.; MASSE, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. Journal of Applied Meteorology, 19(8):1005 - 1012, August 1980.
- NORTON, C.C.; MOSHER, F.R.; HINTON, B.; MARTIN, D.W.; SANTEK, K.; KHULOW, W. A model for calculating atmospheric turbidity over the oceans from geostationary satellite data. Journal of Applied Meteorology, 19(6): 633-644, June 1980.
- 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, January 1973.
- SMITH, W.L. Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point. Journal of Applied Meteorology, 5(5): 726-727, October 1966.
- TARPLAY, J.D. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. Journal of Applied Meteorology, 18(9): 1172-1181, September 1979.
- VISWANADHAM, Y. The relationship between total precipitable water and surface dew point. Journal of Applied Meteorology, 20(1): 3-8, January 1981.
- VONDER HAAR, T.H.; ELLIS, J.S. Determination of the solar energy microclimate of the United States using satellite data; Final Report. S.1., Colorado State University, 1978.
- YAMAMOTO, G. Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor, carbon dioxide and molecular oxygen. Journal of the Atmospheric Sciences, 19(3): 182-188, March 1962.

ABSTRACT

INCOMING SOLAR RADIATION ESTIMATES AT TERRESTRIAL SURFACE
USING METEOROLOGICAL SATELLITE

By using the digital images of the visible channel of the GOES-5 meteorological satellite, and a simple radiative transfer model of the earth's atmosphere, the incoming solar radiation reaching ground is estimated. In this work a model incorporating the effects of Rayleigh scattering and water vapor absorption, the latter parameterized using the surface dew point temperature value, is used. Comparisons with pyranometer observations, and parameterization versus radiosonde water vapor absorption calculations are presented.

C.D.U. - 551.507.362.2:535.215

TABELA 1

CORREÇÕES UTILIZADAS NO MÉTODO.

CORREÇÃO CASO	RADIAÇÃO RECEBIDA I_0 ($W.m^{-2}$)	DETERIORIZAÇÃO DOS SENSORES	CÁLCULO DE u (cm)
1	1383	$C_1 = 1.0$ $C_2 = 0.0$	T_d (Método de Smith-1966)
2	321	$C_1 = 1.0$ $C_2 = 0.0$	T_d (Método de Smith-1966)
3	321	$C_1 = 0.938$ $C_2 = 0.0$	T_d (Método de Smith-1966)
4	321	$C_1 = 0.938$ $C_2 = 0.0$	u (radiossonda)

TABELA 2

RESULTADOS DAS OBSERVAÇÕES FEITAS POR PIRANÔMETROS E POR SATÉLITE

HORA LOCAL	PIRANÔMETRO OC_{\downarrow} ($W.m^{-2}$)	SATÉLITE OC_{\downarrow} ($W.m^{-2}$)	ERRO (%)
09:45	104.6	caso 1 - 376.6	-
		caso 2 - 90.6	13
		caso 3 - 90.6	13
		caso 4 - 90.6	13
15:45	125.5	caso 1 - 505.6	-
		caso 2 - 118.5	5
		caso 3 - 118.5	5
		caso 4 - 118.5	5

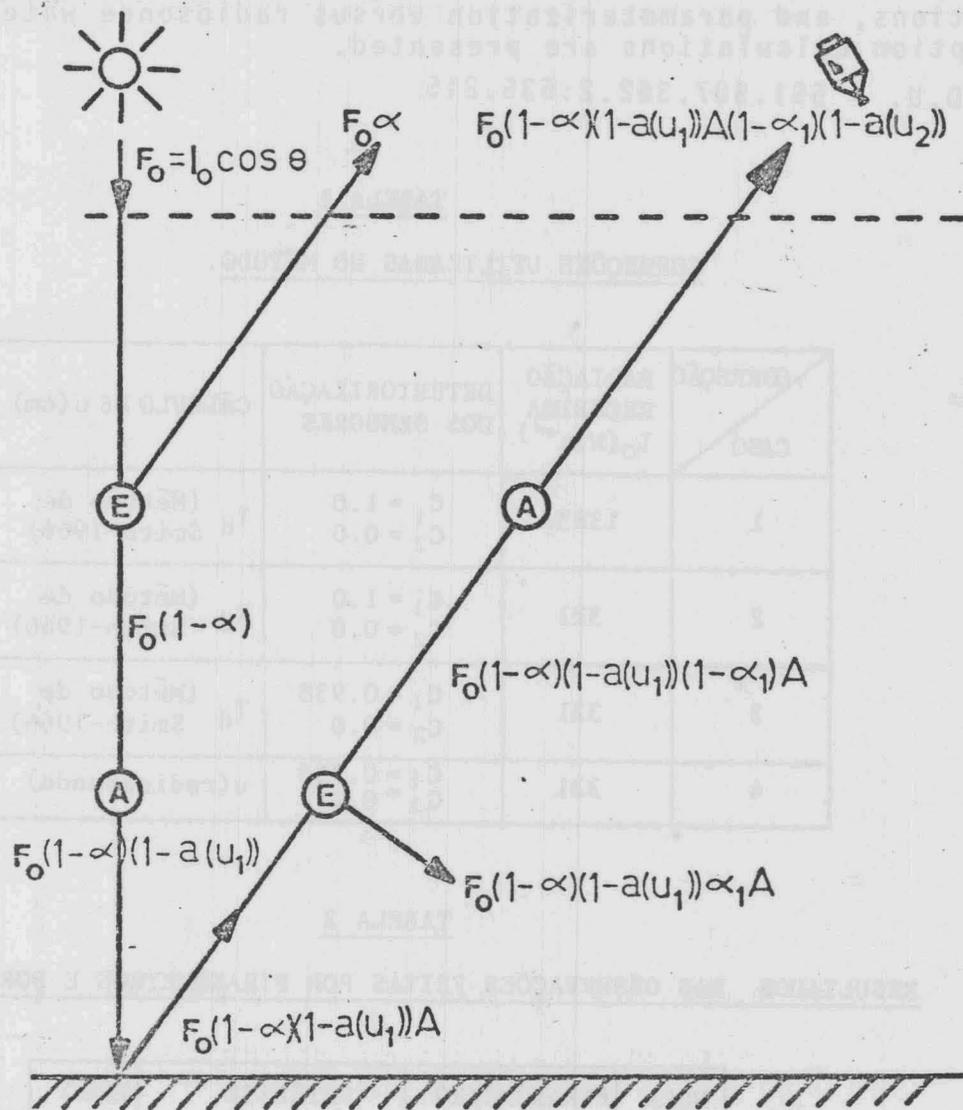


Fig. 1 - Modelo de transferência para céu sem nuvens.

- A) absorção
- E) espalhamento

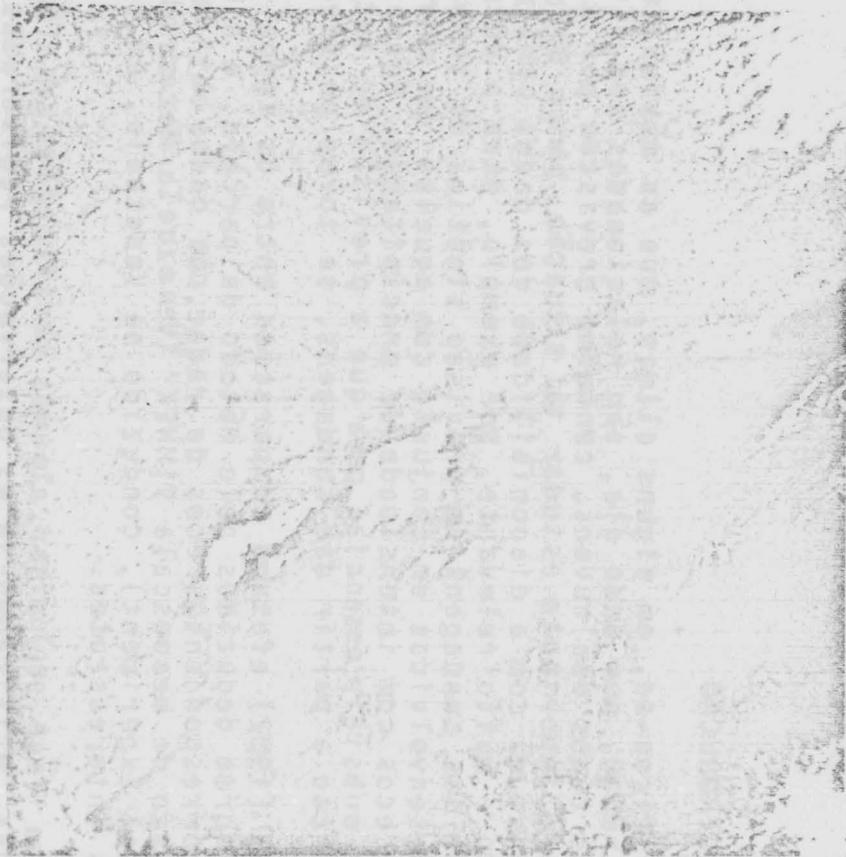


Fig. 2 - Imagem na faixa do visível da região do estado de São Paulo às 15:30 horas (local) do dia 26/Julho/1982.