

MODELO CPTEC GL PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE: VERSÕES GL1.0 E GL1.1.

Juan Carlos Ceballos (e-mail: ceballos@cptec.inpe.br)

Marcus Jorge Bottino (e-mail: bottino@cptec.inpe.br)

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

12630-000 Cachoeira Paulista, SP - Brasil

ABSTRACT.

It is described the model GL1.0 run at CPTEC for assessing solar radiation at ground level, which is based on GOES-8 VIS channel imagery. Some limitations of the model were improved by a GL1.1 version which introduces a more complete assessment of atmospheric gases absorption and an essential change of cloudiness estimates. Errors of the improved model for daily values of mean irradiance have mean value 3 W.m^{-2} and a standard deviation of 29 W.m^{-2} .

INTRODUÇÃO

O monitoramento da irradiação solar é de interesse em setores como agronomia (em conexão com problemas de evapotranspiração e requerimentos hídricos de culturas), engenharia (no contexto do aproveitamento energético) e climatologia (ligada à partição do balanço de energia regional em sistemas terra-atmosfera regionais). Entretanto, sua medição em redes solarimétricas é um problema complicado em países como o Brasil, com grande extensão e com regiões de difícil acesso. As estimativas por satélite são uma alternativa válida para resolver o problema de definição espacial de dados, e em particular os geoestacionários (como o GOES ou Meteosat) fornecem, ainda, uma frequência elevada de imagens que permite estimativas mais acuradas.

Os modelos de estimativa propõem-se a avaliar a relação entre o brilho F observado num elemento de imagem (*pixel*) no topo da atmosfera e a irradiância G que deve incidir à superfície (valor médio na área correspondente a esse pixel). Nos últimos anos, os modelos estatísticos estão sendo abandonados a favor do uso de modelos físicos. Os primeiros estão baseados na proposta de relações empíricas entre F e G , com coeficientes ajustados a partir de observações simultâneas por satélite e em redes solarimétricas; os segundos propõem relações entre as duas grandezas baseadas nas leis de propagação de radiação na atmosfera e em dados meteorológicos genéricos, e têm a vantagem de utilizar as medições de redes à superfície apenas para conferir a qualidade do algoritmo proposto. Diversos modelos físicos têm sido publicados desde a década de 1980, p.ex. o de Gautier *et al.* 1981 para dados GOES, nos Estados Unidos e o IGMK (Stuhlmann *et al.* 1991) utilizando Meteosat, para estimar radiação na África e na Europa. No Brasil, podem ser mencionados trabalhos de Pereira *et al.* (1996) e Ceballos e Moura (1997) estimando radiação solar no Nordeste a partir de imagens Meteosat. Imagens de satélite GOES foram usadas para elaborar um Atlas de irradiação solar no país (INEMET/LABSOLAR, 1998) usando uma adaptação para GOES-8 do modelo IGMK (Pereira *et al.*, 1996). Por outro lado, no INPE foi desenhado um algoritmo para satélite GOES-8, baseado no modelo de Ceballos e Moura (Bastos *et al.* 1996); este modelo teve sua primeira adaptação no CPTEC (versão GL1.0) para estimativas operacionais de irradiação a partir de 1998 (Ceballos *et al.* 1998).

O presente trabalho expõe modificações ulteriores aplicadas ao modelo GL1.0, que conduziram a uma versão aprimorada GL1.1. Esta versão está sendo instalada no CPTEC para monitoramento operacional na escala da América do Sul.

OS MODELOS GL1.0 E GL1.1.

Os dois se baseiam nas mesmas hipóteses físicas de base. Supõem uma atmosfera com carga de aerossol desprezível, e com as nuvens sendo os principais moduladores da radiação que chega à superfície. Considerando o espectro solar dividido em duas regiões (visível e infravermelha próxima), aceitam que:

- No espectro visível [VIS, em λ :(0,4-0,7 μm)] as nuvens são conservativas, assim como a dispersão Rayleigh originada no ar.
- No infravermelho próximo [IVP, em λ :(0,7-3 μm)] a atmosfera não tem efeito Rayleigh apreciável, apresentando-se apenas propagação da radiação direta atenuada pela absorção devida a gases atmosféricos. As nuvens são grandes absorvedoras no IVP, de forma que uma fração C (nebulosidade ou área relativa coberta por nuvens) intercepta a radiação direta com transmitância nula.

Nestas condições, as irradiâncias G no VIS e IVP assim como a total podem ser avaliadas a partir das equações

$$\begin{aligned}
 E \uparrow + (1 - R_{svis}) G_{vis} &= \mu_0 S_{vis} \\
 G_{ivp} &= \mu_0 (S_{ivp} - \Delta S) (1 - C) / (1 - R_{sivp} \cdot C R_n) \\
 G &= G_{vis} + G_{ivp}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$E \uparrow$ = irradiância emergente no VIS no topo da atmosfera (TDA); R_{svis} , R_{sivp} = refletâncias do solo no VIS e IVP; S_{vis} , S_{ivp} = componentes VIS e IVP da constante solar S ; ΔS = irradiância direcional absorvida pelos gases atmosféricos entre o topo da atmosfera e o nível do solo; R_n = refletância da base de nuvens para radiação difusa no IVP; C = nebulosidade (área fracional coberta por nuvens); $\mu_0 = \cos Z_0$ (Z_0 = ângulo zenital do sol). A constante solar S é corrigida pela distância Terra-Sol.

A primeira das equações representa apenas o balanço de radiação no intervalo VIS no sistema terra-atmosfera (a radiação incidente no TDA é absorvida “no céu” ou no solo). O denominador na segunda das equações introduz uma correção à irradiância que passa entre as nuvens, devido a reflexões múltiplas entre o solo e a base de nuvens (hipótese: a radiação ascendente que passa entre nuvens não retorna ao solo).

A irradiância $E \uparrow$ e a nebulosidade C podem ser estimadas a partir de imagens de satélite. Os outros parâmetros correspondem a propriedades físicas no sistema terra-atmosfera. A nebulosidade segue a estimativa proposta por outros autores (Stuhlmann *et al.* 1990)

$$C = (F - F_{\min}) / (F_{\max} - F_{\min}) = (R - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min})
 \tag{2}$$

Nesta expressão a variável F representa o fator de refletância medido para um pixel pelo satélite GOES (Weinreb *et al.* 1997); alternativamente pode ser utilizada a refletância no visível $R = F / \mu_0$. Os termos F_{\min} e F_{\max} são os valores mínimo (associado a uma cena sem nuvens) e máximo (associado a cobertura completa). Finalmente, a irradiância diária é obtida a partir da integração de valores estimados para G em sucessivas imagens durante o período diurno. Uma descrição detalhada de parametrizações utilizadas nas eqs. (1) e (2) e métodos de cálculo encontra-se em Bottino (2000).

O modelo GL1.0 adota a média de G em alvos de 3x3 pixels a fim de poder comparar valores “instantâneos” obtidos por satélite com médias horárias de irradiância medidas por instrumentos de superfície. Considera que a radiação refletida é isotrópica, e que os gases absorventes se reduzem ao vapor d’água atmosférico. O modelo GL1.1 inclui a absorção pelo CO₂ no IVP e pelo ozônio no visível. Esta última é estimada supondo que o O₃ age especialmente na

estratosfera, de forma que na eq. (1) para G_{vis} o fluxo S_{vis} é atenuado enquanto incide com ângulo zenital Z_0 e posteriormente quando emerge com ângulo Z_s na direção do satélite. Estas considerações permitem considerar a troposfera como conservativa, e a atenuação pelo O_3 como correção na estratosfera para os fluxos de entrada e saída no sistema terra-atmosfera.

Estimativas de nebulosidade. Elas são cruciais em todos os modelos por satélite, já que as nuvens são os principais moduladores da radiação solar. Portanto, uma avaliação correta de F_{max} na eq. (2) revela-se de extrema importância. F_{min} pode encontrar-se por um processo de mascaramento de nuvens em imagens sucessivas. Com relação a F_{max} poder-se-ia pensar que cabe optar pelo processo inverso, isto é, procurar o valor máximo do fator de refletância num conjunto de imagens. Todavia, é evidente que isso deve conduzir a valores excessivos: com efeito, uma camada espessa de nuvem estratiforme ou um cumulonimbus correspondem a uma situação de céu completamente coberto mas a sua refletância está bem além do mínimo requerido para a transição entre um campo de nuvens cumuliformes e a fusão de nuvens finitas num campo estratiforme.

O GL1.0 estima F_{max} a partir da estatística dos máximos observados em alvos de 3x3 pixels sobre uma região, adotando a moda desta distribuição e evitando o uso de máximos absolutos. Foi determinado um ciclo diurno de valores F_{max} (baseado em imagens de diferentes horários), permitindo incluir as variações da radiação refletida na direção do satélite quando o sol se desloca no céu (com Z_0 variável).

O modelo GL1.1 é o resultado de uma análise mais criteriosa da estimativa de nebulosidade. Em primeiro lugar, numa imagem cobrindo regiões extensas em um dado instante o ângulo zenital solar é variável e poderia invalidar a definição de um único valor regional de F_{max} . Neste caso, a expressão (2) utilizando a refletância R em vez do fator de refletância é localmente equivalente mas também é aplicável sobre uma região relativamente extensa, desde que para nuvens com espessura moderada a refletância é elevada e varia lentamente com μ_0 . Por outro lado, adota um critério físico simples para especificar F_{max} : a eq. (2) faz sentido apenas para campos cumuliformes; portanto, R_{max} deve corresponder à transição entre um campo cumuliforme e um estratiforme. Para valores superiores de R , a nebulosidade deve ser $C=1$.

ALGUNS RESULTADOS

Um estudo prévio mostrou que imagens multiespectrais de satélite GOES 8 (em cinco canais) podem fornecer informação distintiva de diferentes tipos de pixels, de maneira que apenas quatro variáveis são não redundantes: brilho no canal 1, temperatura de brilho no canal 4 e as respectivas texturas, avaliadas através do desvio padrão em alvos de 3x3 elementos centrados no pixel (Ceballos e Bottino 1998). Foi desenvolvido um método de classificação descrito em outro trabalho destes Anais (Bottino e Ceballos 2000), capaz de discriminar situações de céu sem nuvens, cobertura cumuliforme e diversos tipos de estratiformes. O método foi aplicado a conjuntos de imagens de novembro e dezembro 1998, correspondentes aos estados de Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina (que denominamos de setor Sul-Sudeste). Verificou-se que as cenas sem nuvens correspondiam a valores $R=0,06-0,08$ para o continente e $R\approx 0,03$ para o oceano. Estes valores foram assumidos como R_{min} na eq. (2).

Construindo histogramas de frequência acumulada de pixels em função da refletância R , separados em apenas duas classes: cumuliformes e estratiformes, encontrou-se que o 5% superior do histograma dos primeiros se sobrepõe ao 10% inferior dos estratiformes, de forma que a transição entre as duas categorias se concentra no intervalo $R=0,29-0,33$ (Bottino e Ceballos, 2000). O mesmo intervalo foi observado para todos os horários do período diurno. Assim, o valor $R=0,30 = R_{max}$ foi adotado como “valor universal” da transição, e utilizado na eq. (2) para estimar nebulosidade.

A figura 1 permite comparar resultados das versões GL1.0 e GL1.1 para três locais do Vale do Paraíba (SP), entre os dias julianos 92 a 111 de 2000. São apresentadas irradiancias médias diárias [¹] em $W.m^{-2}$, obtidas para os dias julianos 92 a 111 do ano 2000. A água precipitável

¹ Este valor $\langle G \rangle$ consiste da irradiação diária (medida em $J.m^{-2}$) dividida por 86400 segundos. Para retornar à irradiação diária Q em $MJ.m^{-2}$ basta dividir pelo fator 11,6.

adotada para esta época é $w = 3 \text{ g.cm}^{-2}$. Os conteúdos de CO_2 assumidos são 300 ppm e 0,28 cm.atm respectivamente. A “verdade terrestre” adotada provém de plataformas coletoras de dados fornecendo irradiação diária medida por piranômetro Li-Cor (ver endereço internet www.cmcd.inpe.br). Percebe-se que os dois modelos acompanham os valores de verdade terrestre, mas o GL1.0 apresenta dispersão maior.

A introdução de um único valor R_{max} no modelo GL1.0 gera uma versão GL1.01 cujos resultados são altamente satisfatórios, diferindo pouco do GL1.1 (de fato, a diferença consiste da introdução de absorção relativamente fraca pelo CO_2 e O_3).

A Figura 2 apresenta as mesmas estações e mais uma de Minas Gerais, incluindo as médias semanais das três primeiras. É evidente que as médias semanais resultam melhor alinhadas na diagonal principal (que descreve a igualdade entre modelo e verdade terrestre). A relativa dispersão de pontos do modelo para os valores superiores de irradiação sugere que a presença de baixa nebulosidade (de tipo cumuliforme) ou a presença de cirrus, não detectados satisfatoriamente, podem estar influenciando nos resultados.

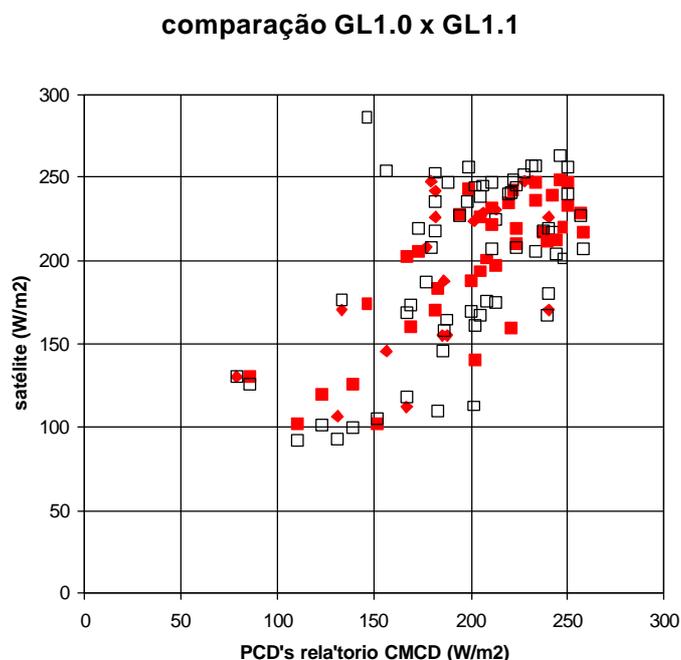


Figura 1. Irradiância média diária, estações Cruzeiro, Queluz e Cunha no estado de São Paulo. Dias julianos 92 a 11 de 2000. Quadrados vazios: modelo GL1.0; quadrados cheios: modelo GL1.1.

modelo GL 1.1

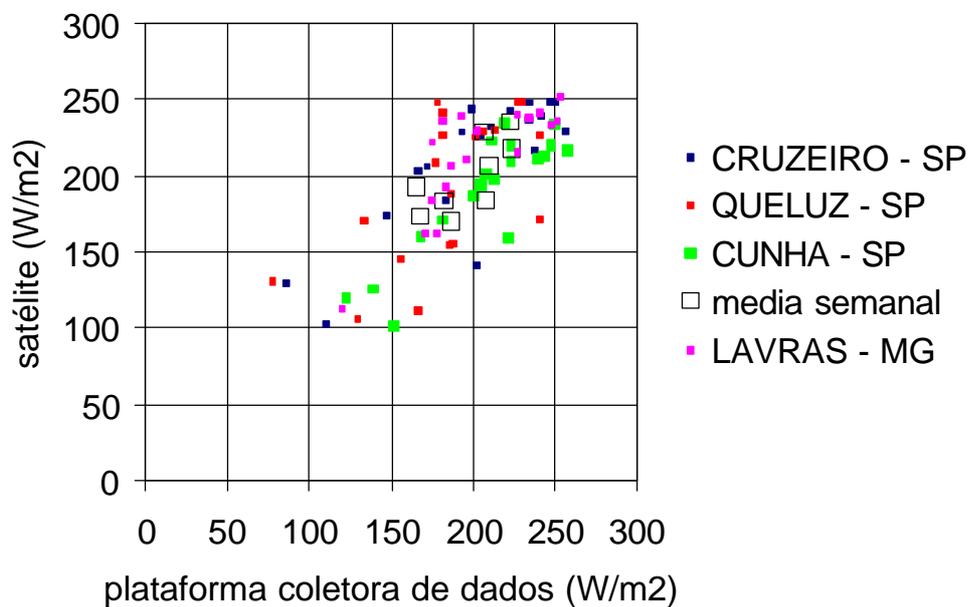


Figura 2. Resultados do modelo GL1.1 para três estações de São Paulo e uma de Minas Gerais, dias 92 a 111 do ano 2000. São incluídas as médias semanais das estações paulistas (quadrado vazio).

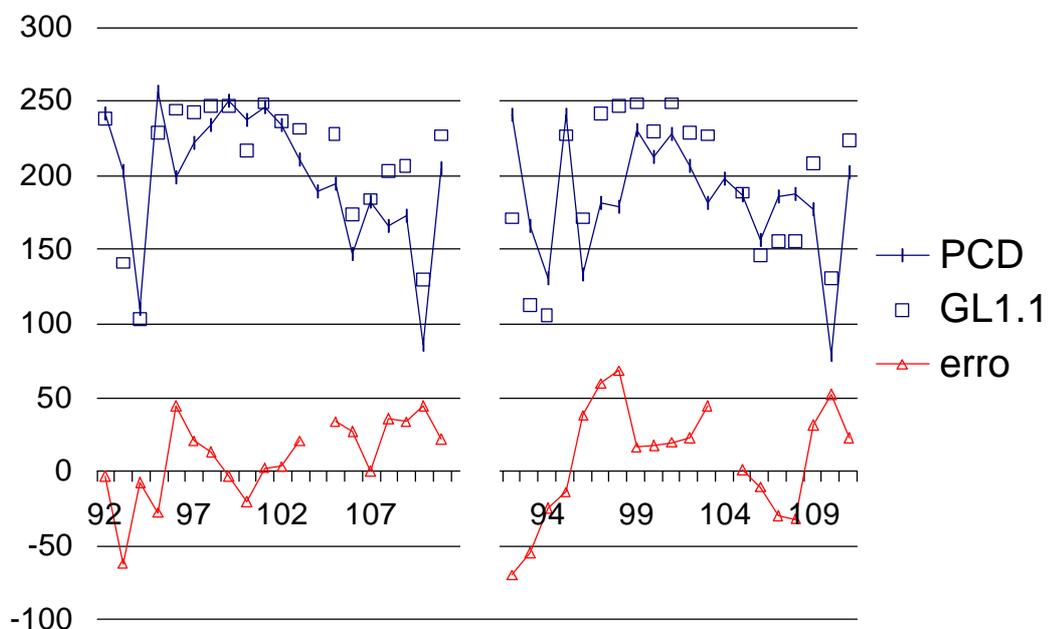


Figura 3. Série temporal de valores de irradiância média diária e dos erros do modelo GL1.1 para duas estações (Cruzeiro e Queluz).

A Figura 3 apresenta a sequência temporal para duas estações (verdade terrestre, modelo GL1.1 e desvio do modelo). Observa-se que o GL1.1 pode apresentar desvios de até $\pm 50-60 \text{ W.m}^{-2}$ para valores diários, mas que em média tende a apresentar desvio nulo. A Tabela resume a estatística dos desvios observados.

Na tabela 1 observa-se que para uma média global de 200 W.m^{-2} o desvio sistemático do GL1.0 é da ordem de 1 W.m^{-2} mas o desvio padrão é elevado, o que significa que desvios consideráveis podem ser encontrados para estimativas diárias. Já no GL1.01 o desvio sistemático nas três estações é relativamente grande e o desvio padrão menor. A diferença pode dever-se a critérios diferentes de seleção de alvos de 3×3 pixels para comparação com PCDs. Em princípio, o GL1.1 detecta valores de alvos mais próximos de uma dada estação (no caso do GL1.01, calcula-se o valor médio em cada alvo da imagem e procura-se o alvo mais próximo da estação; no caso do GL1.1, grava-se o valor de irradiação para cada pixel, procura-se o mais próximo da estação e constrói-se o valor médio do alvo correspondente). Já o modelo GL1.1 apresenta a menor dispersão de valores com relação à verdade terrestre.

PCDs	GL1.0		GL1.01		GL1.1 H2O+O3+ CO2	
	desvio	dpadrao	desvio	dpadrao	desvio	dpadrao
200	1	44	-10	34	3	29

Tabela 1 - Comparação dos desvios nos diferentes modelos para uma irradiância média global de 200 W.m^{-2} .

Deve-se observar que as estatísticas apresentadas não se referem a uma sequência temporal longa. Esta análise está em andamento. Por exemplo, para um conjunto de 6 estações no Vale do Paraíba em novembro de 1998, os desvios do modelo GL1.1 apresentavam valor médio de $+11 \text{ W.m}^{-2}$ e desvio padrão de 24 W.m^{-2} considerando 107 determinações de irradiação diária. As condições de geração de nebulosidade na região são diferentes nas duas épocas do ano (prevalencendo as nuvens convectivas em novembro). Estes resultados sugerem que, dependendo da época do ano (e portanto do tipo de nebulosidade) o desvio médio do modelo pode ter valores diferentes, de qualquer forma inferior ou da ordem de 10 W.m^{-2} , mas uma razoável estabilidade na dispersão associada, da ordem de $25-29 \text{ W.m}^{-2}$. Embora esta dispersão pareça relativamente grande, em escala diária já é da ordem da usualmente aceita para médias mensais. Numa escala semanal o desvio padrão se reduziria a $s' \approx 44/\sqrt{7} = 17$ para o GL1.0 e $29/\sqrt{7} = 11 \text{ W.m}^{-2}$ para o GL1.1.

CONCLUSÕES

A versão GL1.01 introduz uma modificação simples na GL1.0 que aprimora o desempenho do modelo de estimativa por satélite, evitando a estimativa de um ciclo diário de fatores de refletância máximos F_{max} . O valor único de R_{max} encontrado para todos os horários parece caracterizar uma propriedade física (não apenas estatística) da refletância de campos cumuliformes que se fundem numa configuração estratiforme. Os resultados sugerem que esta versão já seria apropriada para monitoramento sistemático da radiação solar no Brasil. Entretanto, análises sistemáticas desta característica estão sendo realizados, para determinação de eventuais variações sazonais e geográficas. A versão GL1.1 introduz aprimoramentos ao incluir a absorção por CO_2 e O_3 . Entretanto, esta absorção adicional é pequena e da ordem dos erros que podem cometer-se na estimativa de nebulosidade, a qual representa o principal fator de modulação da radiação solar.

O modelo GL1.1 apresenta características de erros esperáveis dentro de padrões aceitos internacionalmente, com a vantagem de apresentar um algoritmo simples para fins computacionais. A inclusão de outros fatores de erro, como a influência de nuvens cirrus ou de

camadas opticamente espessas de aerossol de queimadas, poderiam aprimorar seu desempenho em situações que são freqüentes em determinadas épocas do ano.

Reconhecimentos. O presente trabalho teve financiamento parcial do Projeto Fapesp 98/13951-1 e bolsa de produtividade de pesquisa CNPq do primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bastos, E.J., B.M. Funatsu, A. Bonfim, E.C. Moraes e J.C. Ceballos. Estimativa da radiação solar que chega à superfície terrestre utilizando satélite meteorológico. IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais** pp. 596-600, 1996.

Bottino, M.J. **Um modelo de estimativa de radiação solar por satélite: Análise e aprimoramentos.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE., 2000. 101 pp.

Bottino, M.J. e J.C. Ceballos. Classificação de cenas em imagens GOES multiespectrais mediante um método de “nuvens dinâmicas”. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000. **Anais**.

Ceballos, J.C. e M.J. Bottino. Classificação automática de cenas: Uma análise da informação mínima contida em imagens GOES-8 multiespectrais. X Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília, 1998. **Anais**, compact disk art. MS98032.

Ceballos, J.C. and G.B.A. Moura. Solar radiation assessment using Meteosat 4-VIS imagery. **Solar Energy**, v. 60, 208-219, 1997.

Ceballos, J.C.; R.C.G. Pereira; E.J.B. Bastos and E.C. Moraes. Solar radiation monitoring using a physical model and GOES-8 VIS imagery. IX Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris, France, 1998. **Preprints** 430-431.

Gautier, C., G. Diak and S. Masse. 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. **J. Appl. Meteor.**, v. 19, 1005-1012.

Pereira, E.B., S.L. Abreu, R. Stuhlmann, M. Rieland e S. Colle. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data. **Solar Energy**, v. 57, 125-132, 1996.

INEMET/LABSOLAR (Instituto Nacional de Meteorologia / Laboratório de Energia Solar UFSC). **Atlas de irradiação solar do Brasil.** INMET, Brasília. 1998. 58 pp.

Stuhlmann, R., M. Rieland and E. Raschke. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. **J. Appl. Meteor.**, v. 29, 586-603, 1990.

Weinreb, M.M., N. Jamieson, N. Fulton, Y. Chen, J.X. Johnson, J. Bremes, C. Smith e J. Baucom. 1997. Operational calibration of Geostationary Operational Environment Satellite –8 and –9. **Applied Optics**, v. 36, 6895-6904, 1997.