

AVALIANDO RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE

Juan Carlos Ceballos¹, Anthony Carlos Silva Porfirio^{1,2}, Simone Sievert da Costa¹,
Leandro de Oliveira Macedo^{1,3}

(1) Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

(2) Curso de Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET) / INPE

(3) Bolsista PCI CNPq/INPE

INTRODUÇÃO

Conhecer a distribuição geográfica da radiação solar que chega à superfície é de grande importância em meteorologia, climatologia, aplicações agrícolas, gerenciamento de recursos energéticos e, ainda, para a saúde pública. A radiação que chega do Sol é uma forma de energia que pode ser pensada como ondas eletromagnéticas (com intensidades variadas e comprimentos de onda entre 0,1 e 4 μm , ou seja, 100 a 4000 nm), ou como fótons (partículas de luz) deslocando-se como raios diretos (um fluxo direcional). A Figura 1 mostra a distribuição em comprimentos de onda.

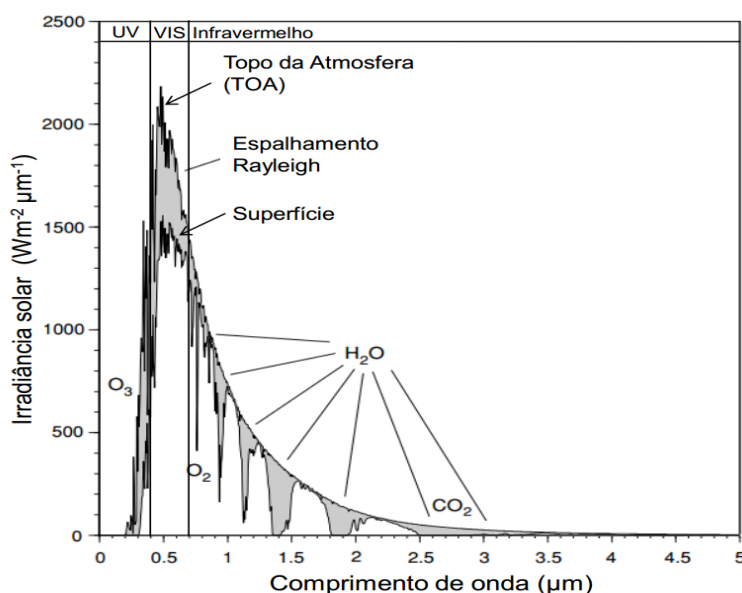


Figura 1 – Irradiância solar espectral (fluxo direcional) no topo da atmosfera (S_{λ}) e no nível da superfície, para uma atmosfera sem a presença de aerossóis nem de nuvens. A atenuação por absorção e espalhamento é indicada pelas regiões em cinza (O_2 : oxigênio, O_3 : ozônio, CO_2 : dióxido de carbono, H_2O : vapor d'água). Fonte: Adaptada de Liou (2002).

Esses raios diretos transportam um valor aproximado de 1367 W m^{-2} . Ao atravessar a atmosfera e antes de chegar à superfície, esse fluxo direto sofre uma série de processos:

- primeiro, atravessa a estratosfera onde o oxigênio (O_2) absorve em comprimentos de onda $\lambda < 250 \text{ nm}$ para formar ozônio (O_3) e, por sua vez, este absorve fortemente sua *componente ultravioleta* ou UV ($\lambda < 400 \text{ nm}$);
- ao encontrar-se com ar e aerossóis, sofre dispersão e absorção principalmente no UV e na *região visível* (VIS, aproximadamente $380 < \lambda < 720 \text{ nm}$) mas alguma radiação direta ainda chega ao solo;
- no *infravermelho solar* ou *IV próximo* (IVS, aproximadamente $700 < \lambda < 4000 \text{ nm}$), ainda pode existir alguma influência de aerossóis mas são gases como H_2O e CO_2 que atuam fortemente, absorvendo radiação e esvaziando alguns intervalos espectrais.

Dessa forma, num dia de céu claro o espectro que chega à superfície é semelhante ao observado na Figura 1. A presença de nuvens é ainda mais influente, porque elas tem forte reflexão no VIS e reflexão intensa mais forte absorção no IVS. A presença de nuvens e aerossol atenua a *radiação direta*

e por dispersão desta gera *radiação difusa*. A variabilidade da espessura e da distribuição espacial das nuvens complica a descrição da variação geográfica da radiação solar. Tem, ainda, um outro fator complicante: que tipo de informação sobre a radiação solar tem utilidade?

- A exposição à radiação UV afeta a pele (um problema de saúde pública) e provoca desgaste de tintas e coberturas (custo industrial e de manutenção);
- A fotossíntese é realizada por absorção de radiação PAR (*Photosynthetically Active Radiation*: PAR). Especificamente, interessaria o fluxo de fótons solares incidente, desde que a fotossíntese realiza-se através da ativação de clorofila por fótons no visível (mais do que pela sua energia);
- Na falta de informação sobre a PAR, a tradição agrometeorológica utiliza um dado indireto: a *insolação* (duração real do período diurno, em que houve incidência de radiação direta);
- A evaporação de superfícies líquidas e evapotranspiração de coberturas vegetais depende fortemente do saldo de radiação (soma total de fluxos radiativos solares e térmicos afetando a superfície), portanto da *radiação global* (direta + difusa), em geral sobre superfícies horizontais. O total diurno denomina-se de *irradiação*;
- Os coletores solares permitem o aquecimento de água residencial, e a energia coletada provém da irradiação sobre um teto inclinado. Já os concentradores solares trabalham com espelhos convergindo radiação a incidência normal (DNI: *Direct Normal Irradiance*) sobre uma caldeira;
- Sem esgotar a lista, a geração de energia elétrica por sistemas de painéis fotovoltaicos depende da irradiação sobre placas inclinadas, as quais são sensíveis a radiação dentro de um intervalo típico 350-1100 nm.



(a)



(b)



(c)

Figura 2 – Alguns instrumentos sensíveis a radiação solar: (a) Heliógrafo de Campbell-Stokes; (b) Piranômetro (célula de silício); (c) Pireliômetro com dispositivo de rastreamento solar.

Dessa forma, existem variados instrumentos medindo radiação solar de acordo com sua finalidade. A Figura 2 ilustra três deles.

- Um heliógrafo (ilustrado na Figura 2a) é constituído por uma esfera de vidro que atua como lente concentradora de raios diretos; queima uma faixa de papel (heliograma) e pelo comprimento queimado indica o *número de horas com sol* (insolação) que houve em um dia. Este instrumento foi inventado por Campbell em 1853, aperfeiçoado por Stokes em 1879 e tem longa tradição de uso nas redes meteorológicas mundiais.
- O instrumento da Figura 2b recebe radiação sobre um detector, que gera uma voltagem (ou corrente) proporcional à *irradiância* recebida na sua faixa de sensibilidade. Por exemplo, um piranômetro de precisão é sensível em 300 a 3000 nm (os conhecidos piranômetros Eppley, ou Kipp & Zonen); existem versões menos acuradas mas com resultado semelhante e preço mais acessível (por exemplo o Li-Cor, sensível em 400-1100 nm). Um detector sensível apenas à radiação UV (intervalo 280-320 nm) funciona como biômetro UVB. Ferreira et al. (2012) ilustram comportamentos de diversas células solares. Nas últimas décadas vêm sendo instaladas numerosas estações automáticas que incluem piranômetros. No Brasil, a rede do INMET fornece informação horária de mais de 500 estações (<http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>) e o SINDA (Sistema Integrado de dados Ambientais, gerenciado pelo INPE) abrange algumas centenas de estações com informação integrada a cada três horas (<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/index.php>).
- O instrumento da Figura 2c é mais complexo. Trata-se de um pireliômetro. Com sua geometria de canhão, limita a recepção aos fluxos *DNI*; dotado de um sistema de acompanhamento (*tracking*)

solar, permite avaliar a irradiação diária Q_{DN} . Instrumentos como o CIMEL dispõem de filtros em vários comprimentos de onda, fornecendo informação útil para detecção da carga óptica de aerossol atmosférico (CASTANHO, 2005, cap. 4). Este tipo de instrumento existe em redes limitadas, por exemplo a SONDA (<http://sonda.ccst.inpe.br/>) ou AERONET (*Aerosol Robotic Network*, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Modelos alternativos como MRSR (*Multifilter Rotating Shadowband Radiometer*) permitem medir radiação global e difusa (portanto a direta) em intervalos espectrais estreitos (ROSÁRIO, 2006).

Certamente, dispor de uma rede densa com todos os radiômetros necessários para variadas finalidades é uma tarefa de alto custo, tanto instrumental como de manutenção. O problema é ainda maior em países com dimensões continentais como o Brasil, onde extensas regiões têm problemas de acesso e de infraestrutura. Assim, o sensoriamento remoto por satélites aparece como uma alternativa para ter informação com boa resolução espacial e, se possível, alta frequência de amostragem.

SATÉLITES AMBIENTAIS: SEU USO POTENCIAL NO BRASIL

Os produtos mencionados nas seções seguintes são operacionais e utilizam diariamente o potencial de informação de satélites polares e geoestacionários sobre o Brasil. É importante mencionar que o INPE recebe e armazena imagens no formato moderno (digital de alta resolução) desde a década de 1980. Assim, o Brasil dispõe de um acervo valiosíssimo de 25 a 30 anos de informação satelital de alguns satélites, para reconstrução de séries temporais de variáveis meteorológicas diversas. Neste espaço fazemos menção apenas a algumas informações, atinentes à estimativa de variáveis relacionadas com radiação solar. Imagens visualizadas nos diferentes canais de variados satélites estão disponíveis em <http://satelite.cptec.inpe.br/home/novoSite/index.jsp>. Na Tabela 1 enumeram-se satélites entre a década de 1980 e o presente. O número de canais e a resolução espacial e temporal pode variar para satélites sucessivos; indicam-se as informações do sensor mais recente.

Tabela 1 – Satélites com informação de interesse para produtos de radiação solar sobre o Brasil.

Satélite	Posição	Sensor	Frequência	Canais	Resolução
GOES 8, 12, (10, 12), 13	75 (60)°W	Imager	30 (15) minutos	5	1-4 km
Meteosat 7, 8, 9	0 °E	SEVIRI	15 minutos	12	1-3 km
NOAA 14, 15, ..., 19	polar	AVHRR	1 / dia	5	1 km
EOS - Aura	polar	OMI	1 / dia	740	13×24 km
EOS - Terra e Aqua	polar	MODIS	1 / dia	32	250-500m

Os satélites GOES-East (<http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/status.html>) e MSG (<http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/index.html>) são geoestacionários, apropriados para monitoramento contínuo da evolução de sistemas meteorológicos.

Os satélites ambientais da série NASA-EOS (Terra, Aqua, Aura) são especialmente desenhados para monitoramento ambiental. Passam uma vez de dia e outra de noite sobre a mesma região. A quantidade de canais e a melhor resolução espacial permitem o monitoramento detalhado de parâmetros com menor variabilidade temporal (refletância do solo, emissividade) e amostragem de outras variáveis em algumas horas (aerossóis, conteúdo de gases, perfis de temperatura).

A página internet <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/> descreve diversos produtos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Esse sensor representa a versão avançada do AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>) e HIRS (*High Resolution Infrared Radiation Sounder*, http://www.nsof.class.noaa.gov/data_available/tovs_atovs/index.htm) transportados nos satélites NOAA-n.

O endereço http://www.nasa.gov/mission_pages/aura/spacecraft/omi.html informa sobre o sensor OMI (*Ozone Monitoring Instrument*), que observa radiação solar refletida no VIS e UV.

RADIAÇÃO PAR E GLOBAL

A radiação solar incide sobre o planeta como um fluxo direcional S_0 (“constante solar”) e sofre um conjunto complexo de interações com a atmosfera. Um satélite dispõe de um sensor com vários detectores sensíveis em intervalos ou bandas espectrais $d\lambda$ (trata-se do sensor Imager nos GOES, ou SEVIRI nos *Meteosat Second Generation*). Quando um satélite observa um ponto da Terra, os detectores registram quanto fluxo dF (W m^{-2}) recebem em $d\lambda$, dentro de um ângulo sólido pequeno $d\Omega$ (em ster = esterradianos), sendo dA a área dos sensores. A informação transmitida à Terra é o valor da radiância espectral $L_\lambda = dF/(d\Omega \cdot dA \cdot d\lambda)$, $\text{W m}^{-2} \text{ster}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. A Figura 3 ilustra a informação que é percebida numa banda do visível. Na Figura 4 é apresentado um esquema das interações da radiação solar com a atmosfera e superfície. No espectro UV+VIS, o ozônio com maior concentração na estratosfera absorve parte da irradiância incidente ES_{vis} e da emergente Ep_{vis} . Na troposfera, o ar, os aerossóis e as nuvens dispersam e parcialmente absorvem radiação. Esta chega ao chão e sofre absorção e reflexão. No IV solar há pouca dispersão pela atmosfera, mas gases como H_2O e CO_2 absorvem, assim como nuvens (altamente refletoras e absorvedoras de radiação infravermelha). Toda a informação disponível via satélite é a radiância visível captada em uma banda estreita no GOES, ou em duas bandas estreitas no SEVIRI. O desafio é estimar o fluxo total que chega à superfície no visível (G_{vis}) e no espectro solar total (radiação global G , soma de G_{vis} e G_{iv}).

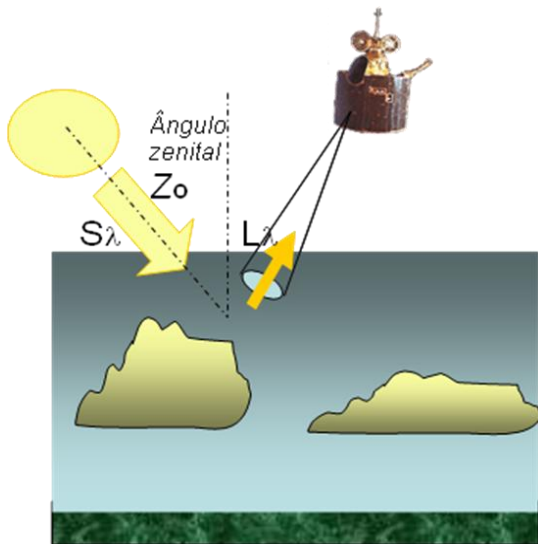


Figura 3 – Esquema de recepção de radiação solar refletida L_λ e observada por um satélite.

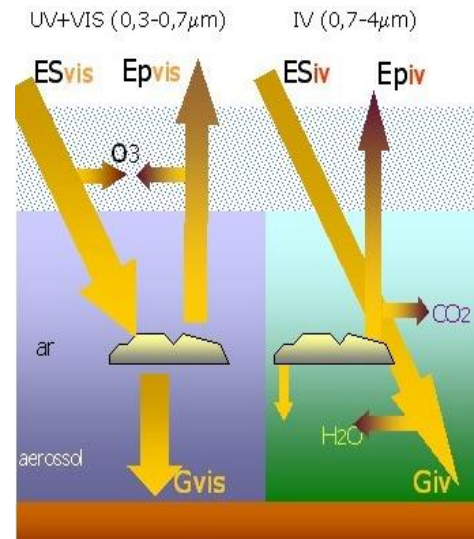


Figura 4 – Interação entre atmosfera e radiação solar para gerar radiação visível (G_{vis}) e infravermelha (G_{iv}).

Muitos modelos foram publicados desde 1979, tentando ligar a informação L_λ com G_{vis} e G . Dentre os mais conhecidos e fisicamente fundamentados, pode-se mencionar os de Gautier et al. (1980), Pinker e Laszlo (1992), e o IGMK da Universidade de Colônia (STUHLMANN et al., 1990). Este último foi desenvolvido para estimativas com imagens SEVIRI e adaptado para uso no Brasil com imagens GOES, dando origem a um Atlas de radiação solar no país (PEREIRA et al., 2006). Descrevemos aqui o modelo desenvolvido no CPTEC, denominado de GL e atualmente na versão 1.2 (CEBALLOS et al., 2004). A partir da Figura 4, os algoritmos fundamentais do modelo são dois, para o espectro visível e para o infravermelho solar:

$$ES_{\text{vis}} \cdot T_3(\cos Z_o) = Ep_{\text{vis}}/T_3(\cos Z_s) + (1 - R_{\text{vis}}) \cdot G_{\text{vis}} + A \quad (1)$$

$$(ES_{\text{iv}} - \Delta ES_{\text{iv}}) \cdot (1 - C) / (1 - C \cdot R_{\text{siv}} \cdot R_n) = G_{\text{iv}} \quad (2)$$

A primeira equação expressa o balanço de energia na troposfera, sendo T_3 a transmitância do ozônio na estratosfera, para ângulo zenital de entrada Z_o e de saída Z_s (na direção do satélite); R_{vis} é a refletância do solo, e A a absorção na troposfera. Na segunda equação, para uma cobertura C de

nuvens apenas a fração 1-C enxerga o solo mas a absorção por vapor d'água e dióxido de carbono retira uma quantidade ΔES_{iv} . O denominador introduz o efeito de múltiplas reflexões entre o solo (com refletância R_{siv}) e a base de nuvens (com refletância R_n). Na sua versão 1.2, o modelo GL supõe que: 1) a troposfera tem absorção desprezível no visível; 2) as nuvens têm transmitância desprezível no infravermelho solar. Ainda, introduz valores típicos constantes de refletância do solo e base de nuvens, assim como de água precipitável. O resultado é ilustrado na Figura 5, que apresenta a distribuição de irradiância média diária sobre a América do Sul. Valores diários e mensais são publicados na página Web <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>. A Figura 6 ilustra a qualidade dos resultados obtido no Nordeste do Brasil em dezembro de 2010; os dados disponíveis para comparação provinham da rede SONDA, estação Petrolina – PE (CEBALLOS et al., 2011).

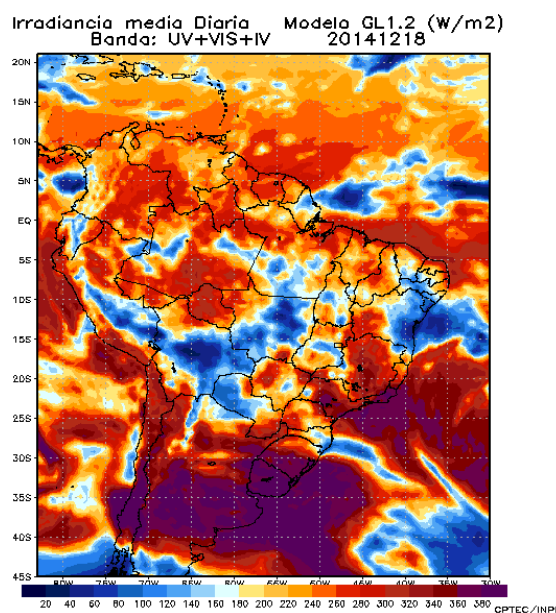


Figura 5 – Distribuição de irradiância média (em $W\ m^{-2}$) no dia 18 de dezembro de 2014, estimada com o modelo GL versão 1.2.

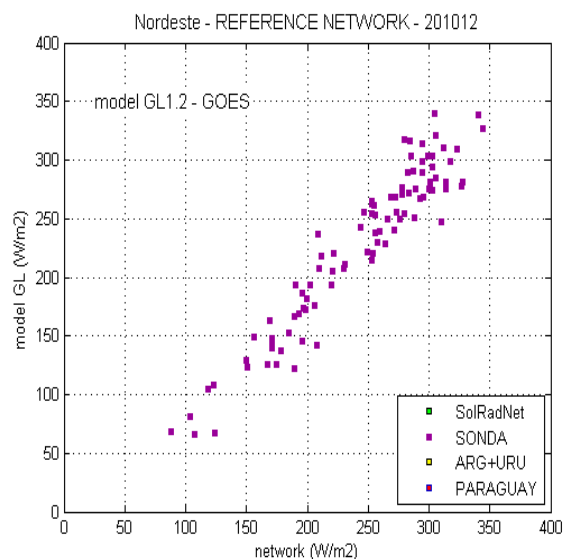


Figura 6 – Irradiância média diária. Comparação do modelo GL 1.2 com estações SONDA no Nordeste do Brasil. Dezembro de 2010. Fonte: Ceballos et al. (2011).

A resolução espacial do modelo GL é de $0,04^\circ$ para imagens GOES, e atualmente abrange uma série de mais de 15 anos, o que permite começar a realizar estudos com valor climatológico no continente. Para esse tipo de análise, no endereço internet mencionado está disponível uma série temporal com resolução de $0,4^\circ$ e médias pentadais (em cinco dias), abrangendo o período 1996-2013.

Aprimoramentos do modelo requerem a distribuição mais detalhada da distribuição geográfica de refletância do solo e de água precipitável. Em situações de poluição extrema, o termo de absorção A deve ser estimado. Os resultados obtidos pela versão 1.2 do modelo evidenciam que a qualidade de um modelo simplificado depende fortemente da estimativa de nebulosidade. Na seção seguinte é descrito o método de cálculo para o parâmetro C .

ESTIMANDO HORAS COM SOL

Em muitas estações meteorológicas do mundo existe uma tradição consolidada com mais de um século de insolação diária fornecida por heliógrafo. Agrônomos correlacionam esta informação com produtividade agrícola, e mais recentemente engenheiros o fazem com potencial de produção de eletricidade por painéis fotovoltaicos. Um método simples para estimativa de insolação por satélite surge da classificação de nuvens em imagens GOES (BOTTINO e CEBALLOS, 2003), ilustrada na Figura 7. Para consultar imagens abrangendo América do Sul a cada meia hora, pode ser acessado o endereço <http://sigma.cptec.inpe.br/nuvens/>. Escolhendo uma amostragem elevada de pixels, observam-se frequências diferentes para a refletância de pixels com presença de nuvens cumuliformes (Cu) e de nuvens estratiformes (St). A Figura 8 evidencia que o último decil da distribuição (frequência relativa 0,9-1) para pixels cumuliformes corresponde a refletâncias superiores a 43%; por outro lado, o primeiro decil dos estratiformes tem refletância entre 40 e 47%. Uma refletância $R_{max} \sim 46\%$ indicaria a transição entre nuvens Cu e St. Assim, o brilho entre $R_{min} \sim 6\%$ e $R_{max} \sim 46\%$ corresponde a nuvens do tipo Cu; se C é a área relativa de céu coberto num pixel, então a refletância R observada pode ser vista como uma soma ponderada de forma que

$$R \text{ (percebido)} = C R_{max} + (1-C) R_{min} \quad (3)$$

para $R < R_{min}$ a cobertura é nula ($C = 0$) e para $R > R_{max}$ é total ($C = 1$). Na escala subpixel, apenas nuvens cumuliformes têm $C < 1$.

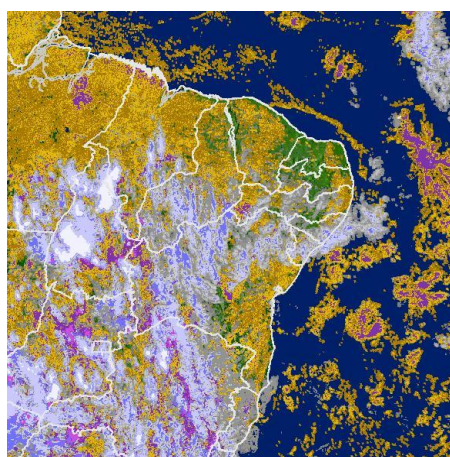


Figura 7 – Classificação de nuvens sobre o Nordeste do Brasil. Nuvens Cu (amarelo), St (roxo), Cirrus (cinza) e multicamadas (azul claro).

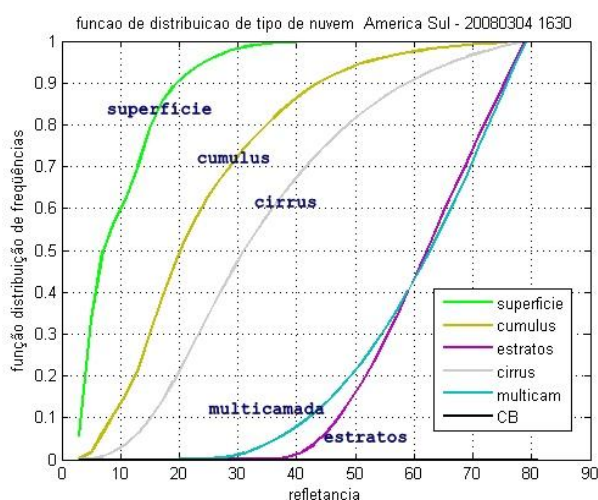


Figura 8 – Distribuições de frequência de diferentes tipos de nuvens (na dimensão de um pixel: 4 km). Fonte: Ceballos e Rodrigues (2008).

A Equação 3 pode ser aproveitada para avaliar insolação. Com efeito, se δt é o tempo entre imagens sucessivas de satélite, o valor de C para um pixel pode ser interpretada como fração de área coberta por nuvem no instante da imagem, ou como fração de intervalo δt com passagem de nuvens sobre um ponto do pixel; a insolação diária N_{sat} pode ser avaliada como a soma

$$N_{sat} = \sum_i (1 - C_i) \delta t_i \quad (4)$$

O estimador N_{sat} pode ser comparado com o valor N_{ef} efetivo que um pireliômetro mediria. Qual seria esse valor? No intervalo δt_i e na ausência de nuvens o fluxo direcional ou específico médio seria DNI_o (influenciado apenas pela atenuação do ar e de aerossol). Desde que o fluxo DNI é nulo se uma nuvem passar, o valor DNI_i medido em δt_i sugere interpretar o quociente DNI_i/DNI_o como a fração de tempo com céu sem nuvem obstruindo a visada, e a insolação efetiva N_{ef} ao longo de um dia resulta

$$Nef = \sum_i (DNI_i / DNI_o) \delta t_i \quad (5)$$

A Figura 9 ilustra o resultado da estimativa N_{sat} para a média mensal de outubro de 2014, utilizando o canal VIS do GOES (frequência de imagens: uma a cada meia hora).

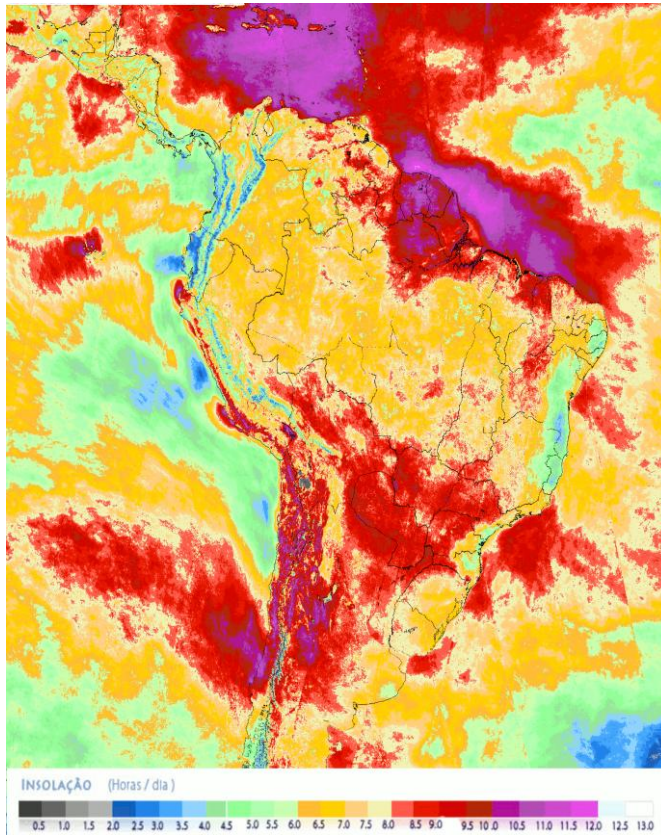


Figura 9 – Insolação média mensal para o mês de outubro de 2014, avaliada pela eq. 4. Resolução espacial 0,04° (aproximadamente 4 km).

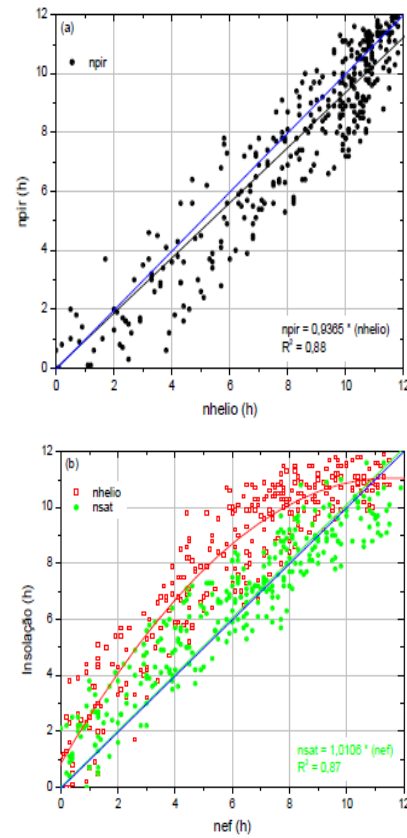


Figura 10 – Insolação em Petrolina, 2007/2008. (a) Relação entre medida de heliógrafo (N_{helio}) e definição da OMM (N_{pir}). (b) Relação N_{helio} (vermelho) e N_{sat} (verde) com a medida pireliométrica N_{ef} . Fonte: Porfirio e Ceballos (2012).

A análise crítica da Equação 4 abre uma interessante linha de trabalho. Heliógrafos não se comportam de acordo com a Equação 5, porque existe um patamar de queima pelos raios solares (120 W m^{-2}). A Organização Meteorológica Mundial recomenda a validação de dados heliográficos mediante pireliômetro, considerando o tempo durante o qual $DNI > 120 \text{ W m}^{-2}$. O critério é equivalente à Equação 5, mas assumindo frações de tempo binárias: nula se $DNI_i < 120 \text{ W m}^{-2}$, unitária se $DNI_i \geq 120 \text{ W m}^{-2}$, com intervalos δt tão pequenos como for possível. A Figura 10 compara resultados para Petrolina em 2007/2008: percebe-se que N_{helio} é compatível com N_{pir} (acompanhando o uso já padronizado nas práticas agrometeorológicas), enquanto N_{sat} se ajusta satisfatoriamente a N_{ef} (sendo de utilidade direta para modernas técnicas de aproveitamento energético). A Figura também sugere que N_{helio} admite um ajuste quadrático local com N_{ef} (PORFIRIO e CEBALLOS, 2012).

IRRADIAÇÃO A INCIDÊNCIA DIRETA NORMAL

Recentes estudos têm comprovado a viabilidade da geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos de alta concentração (VIANA et al., 2011) e sistemas heliotérmicos com tecnologia denominada de *Concentrating Solar Power* CSP (MARTINS et al., 2012). As informações básicas de interesse são: $DNI(Z_o)$ e Q_{DN} , com Z_o = ângulo zenital solar. A inviabilidade de criar redes de medição sugere usar algum tipo de ajuste, por exemplo, com medições de heliógrafo; entretanto, suas características (mencionadas na seção anterior) requerem de pesquisa extensiva sobre esta metodologia. Outra opção é o uso de imagens de satélites geoestacionários. Nesse caso, as estimativas baseiam-se no uso de um modelo físico parametrizado de estimativa de DNI sob céu claro (DNI_o) combinado com informações meteorológicas auxiliares e imagens de refletância do canal VIS do satélite GOES ou Meteosat. A partir de uma sequência de imagens, a irradiação Q_{DN} pode ser avaliada como

$$Q_{DNsat} = \sum_i DNI_i = \sum_i DNI_{oi} (1 - C_i) \delta t_i \quad (6)$$

Nesta expressão, DNI_i é a integral de DNI_o no tempo δt_i entre duas imagens, ponderada com a nebulosidade parcial definida pela Equação 3. Para avaliar DNI_o , estudos teóricos e experimentais (PORFIRIO, 2012) conduziram a adotar o modelo REST proposto por Gueymard (2003,ab). Os parâmetros atmosféricos necessários resumem-se em: pressão atmosférica à superfície, conteúdo total de ozônio, água precipitável e coeficiente de turbidez de Angstrom. A maior parte destes parâmetros é inferida por satélites e saídas de modelos de previsão de tempo com satisfatória acurácia (PORFIRIO, 2012; PORFIRIO e CEBALLOS, 2013).

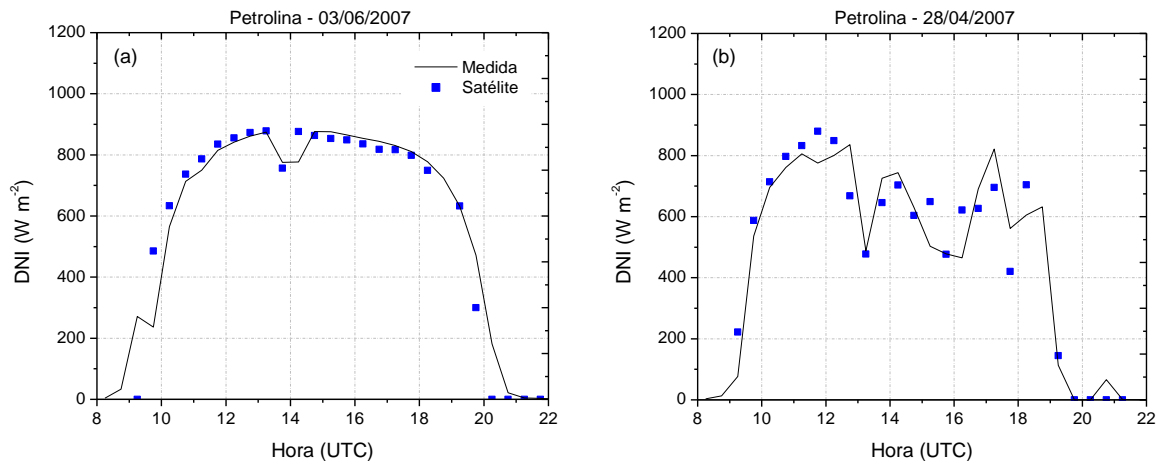


Figura 11 – Ciclo diário de DNI medido e estimado por satélite para o sítio experimental da rede SONDA em Petrolina/PE: (a) dia de céu claro e (b) dia de céu parcialmente nublado.

A Figura 11 ilustra ciclos diários de DNI medida e estimada por satélite. Evidencia-se que o modelo representa satisfatoriamente o ciclo diário de DNI, tanto na condição de céu claro como na parcialmente nublada. Os erros médios diários associados à estimativa limitaram-se ao máximo de $\pm 15 \text{ W m}^{-2}$. A Figura 12 permite comparar valores diários medidos e estimados por satélite. Em geral, percebe-se boa concordância entre modelo e observações. A análise estatística sugere uma leve superestimativa do modelo, MBE (*Mean Bias Error*) da ordem de 1% com relação ao valor médio do período ($16,4 \text{ MJ m}^{-2}$). Comparações para outros locais com distintas condições climáticas e ambientais estão em andamento. Um exemplo de aplicação do método é visualizado na Figura 13 para o Nordeste Brasileiro. Embora preliminares, os resultados sugerem que este método de estimativa de DNI pode ser aplicado operacionalmente e difundido na página de Radiação Solar e Terrestre da DSA. Ainda, a estimativa operacional de DNI permitirá avaliar também a fração de radiação solar que é radiação difusa.

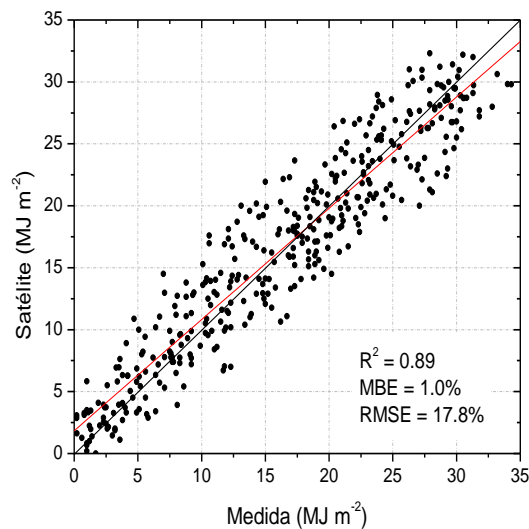


Figura 12 – Comparação entre irradiação solar direta normal medida e estimada por satélite para Petrolina/PE. Período 2007-2008.

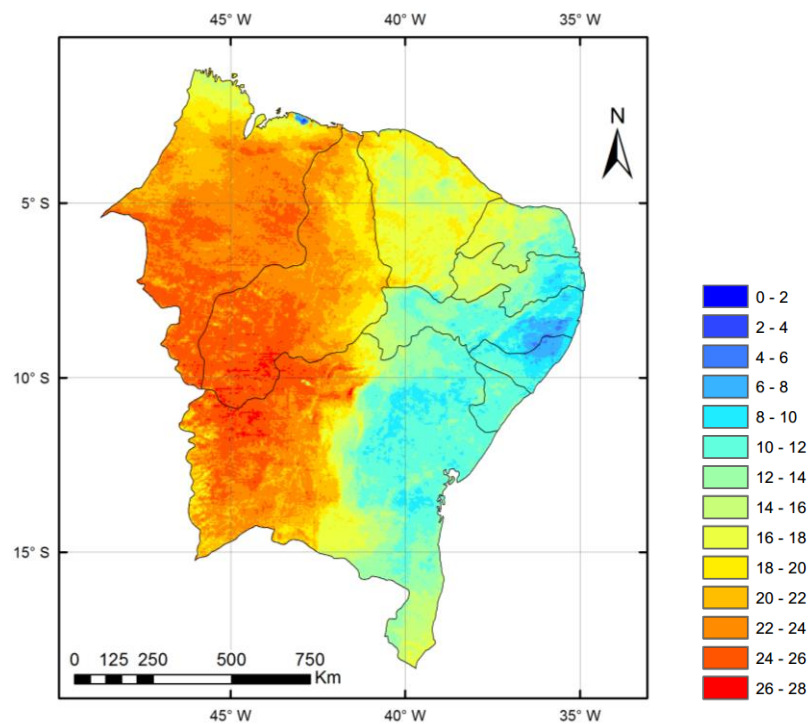


Figura 13 – Distribuição espacial da irradiação solar direta normal para julho de 2008 (em MJ m^{-2}). Fonte: Porfirio e Ceballos (2014).

PERSPECTIVAS FUTURAS

As imagens de satélites geoestacionários como o GOES permitem gerar produtos associados à radiação solar, com alta frequência e erros relativamente pequenos, que fornecem informação detalhada sobre a América do Sul. Os métodos são aplicáveis a imagens de outros satélites como o Meteosat, e permitirão ampliar a área de abrangência ao continente africano e sul europeu. Os satélites de órbita polar permitem avaliar parâmetros adicionais que aprimoram os modelos desenvolvidos. O Grupo de Radiação Solar, Terrestre e Atmosférica da DSA/CPTEC vem desenvolvendo esses aprimoramentos, incluindo a perspectiva de uso de satélites da nova geração como o GOES-R com seu sensor ABI ou (*Advanced Baseline Imager*, ver <http://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html>). Diversos usuários da agrometeorologia, tecnologia de energia renovável, estudos de meio ambiente e modelagem de tempo e clima serão beneficiados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOTTINO, M. J.; CEBALLOS, J. C. Classification of Scenes in Multispectral Goes-8 Imagery. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1129-1135. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.18.11.01.31/doc/11_385.pdf>. Acesso em: 22.05.2014.
- CASTANHO, A. D. A. **Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo**. 2005. 250 f. Tese (Doutorado em Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.
- CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J.; SOUZA, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **J. Geophys. Res.**, v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.
- CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L. Estimativa de insolação mediante satélite geoestacionário: resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBMET, 2008. Disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/docs/RefIN/Cebs_Rodr_insolacao_15CBMET2008>. Acesso em: 22.05.2014.
- CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L.; MACEDO, L. O. Desempenho do modelo GL versão 1.2, época: outubro 2010 – dezembro 2010. Relatório Técnico 01/11-RST-DSA, 2011. Disponível em: <<http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/docs/RefTT/RTecnico001-2011-RST-20110624b.pdf>>. Acesso em: 25.11.2014.
- FERREIRA, T. A.; BERNI, L. A.; PAES, T. F.; VILELA, W. A.; BELOTO, A. F. Sistema para caracterização espectral de dispositivos fotovoltaicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 4., 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CBENS, 2012. Disponível em: <<http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/11.28.19.12.17/doc/>>. Acesso em: 25.11.2014.
- 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**, v. 19, p. 1005-1012, 1980.
- GUEYMARD, C. A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: Detailed theoretical performance assessment. **Solar Energy**, v. 74, p. 355–379, 2003a.
- GUEYMARD, C. A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high quality measurements. **Solar Energy**, v. 74, p. 381–395, 2003b.
- LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Academic Press. Los Angeles – Califórnia, 2ª Edição, 2002.
- MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. **Energy Policy**, v. 48, p. 640-649, 2012.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. INPE, 1. ed. São José dos Campos, p. 66, 2006.
- PINKER, R. T.; LASZLO, I. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. **Journal of Applied Meteorology**, v. 31, p. 194-211, 1992.
- PORFIRIO, A. C. S. **Estimativas de irradiação solar direta normal mediante satélite: um estudo para o Nordeste brasileiro**. 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2012.
- PORFIRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C. Comparação entre diferentes métodos de estimativa de insolação: uma aplicação às estações de Petrolina e Natal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17., 2012, Gramado. **Anais...** Gramado: SBMET, 2012. Disponível em: <<http://www.sbmet.org.br/cbmet2012/pdfs/64ET.pdf>>. Acesso em: 25.11.2014.
- PORFIRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C. Um método de estimativa de irradiação solar direta normal a partir de imagens de satélite geoestacionário: resultados preliminares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 6471-6479. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1520.pdf>>. Acesso em: 25.11.2014.
- PORFIRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C. Validação da estimativa de irradiação solar direta normal por satélite. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5., 2014, Recife. **Anais...** Recife: SBMET, 2014. Disponível em:

<http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/docs/RefGL/PorfirioeCeballos_VCBENS-2014.pdf>. Acesso em: 25.11.2014.

ROSÁRIO, N. M. E. **Comparação de profundidades ópticas espectrais do aerossol obtidas para São Paulo a partir de um *Multifilter Rotating Shadowband Radiometer* e do fotômetro solar da AERONET**. 2006. 250 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; RASCHKE, E. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 29(7), p. 586-603, 1990.

VIANA, T. S.; RUTHER, R.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. **Solar Energy**, v. 85. p. 486-495, 2011.