

## MAPEAMENTO DOS RECURSOS DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL UTILIZANDO MODELO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA BRASIL-SR

Fernando R. Martins – [fernando@dge.inpe.br](mailto:fernando@dge.inpe.br)

Enio B. Pereira – [eniobp@cptec.inpe.br](mailto:eniobp@cptec.inpe.br)

Ricardo A. Guarnieri – [ricardog@cptec.inpe.br](mailto:ricardog@cptec.inpe.br)

Sheila A. B. Silva – [sheila@dge.inpe.br](mailto:sheila@dge.inpe.br)

Cristina S. Yamashita – [cristina@dge.inpe.br](mailto:cristina@dge.inpe.br)

Rafael C. Chagas – [rafael@dge.inpe.br](mailto:rafael@dge.inpe.br)

Divisão de Clima e Meio Ambiente – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE)

Samuel L. Abreu – [samuel@emc.ufsc.br](mailto:samuel@emc.ufsc.br)

Sergio Colle – [sergio@umc.ufsc.br](mailto:sergio@umc.ufsc.br)

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Energia Solar. (LABSOLAR/UFSC)

### 1. Radiação solar e dados meteorológicos

**Resumo.** *Este trabalho apresenta os resultados obtidos pelo Projeto SWERA no mapeamento dos recursos de energia solar para o território brasileiro. O projeto foi financiado pelo GEF/UNEP teve como objetivo o desenvolvimento de uma base de dados consistente, com alta confiabilidade e acessibilidade, a fim de promover a inserção das energias solar e eólica na matriz energética de países em desenvolvimento. No Brasil, o projeto foi desenvolvido sob a coordenação da Divisão de “Clima e Meio Ambiente” do CPTEC/INPE e produziu mapas de irradiação solar incidente na superfície utilizando o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR alimentado por informações extraídas de satélites meteorológicos geoestacionários e dados climatológicos. O artigo discute a metodologia empregada para a produção dos mapas solarimétricos e para determinação da confiabilidade dos resultados. São apresentados e discutidos os mapas de valores médios anuais e sazonais das componentes global e incidente em plano inclinado referentes ao período de Julho/1995 a Dezembro/2005. Esses mapas possuem aplicações imediatas em diversos setores da atividade econômica tais como o planejamento energético, desenvolvimento de projetos para uso dos recursos solares, arquitetura e construção civil, agronegócios, etc. No artigo, também, estão discutidas a variabilidade anual e sazonal do fluxo de radiação incidente na superfície. Os resultados mostram que, mesmo nos estados da região Sul do país, a média anual da disponibilidade de energia solar no Brasil é superior à verificada em países europeus, como Alemanha, Espanha e França, onde a exploração dessa fonte de energia vem sendo realizada de forma crescente nos últimos anos.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar, transferência radiativa, dados climatológicos, imagens de satélite, modelagem atmosférica.*

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda e consumo de energia decorrente do progresso tecnológico e do avanço no desenvolvimento humano é apontado como o fator mais importante na aceleração das alterações climáticas e ambientais observadas e descritas pela comunidade científica. O crescimento do consumo de energia mais que triplicou após a Revolução Industrial e estudos recentes mostram uma tendência de crescimento da demanda energética em consequência da melhoria de qualidade de vida nos países em desenvolvimento. Essa tendência de crescimento indica que, provavelmente, na se-

gunda década deste século, o consumo de energia nos países desenvolvidos seja ultrapassado pelo consumo nos países em desenvolvimento (Goldemberg e Vilanueva, 2003). O aumento da demanda energética em conjunto com a elevação do custo dos combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente está impulsionando a pesquisa, o desenvolvimento e o incentivo à adoção de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental. No Brasil, diversos programas de incentivo ao consumo de biocombustíveis, à energia eólica e às pequenas centrais hidrelétricas encontram-se em implementação.

A energia solar é uma das alternativas naturais para atender a essa demanda energética e, atualmente, a tecnologia energética que apresenta maior crescimento no mundo são os sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica apesar de seu ainda elevado custo (Mints, 2006). A conversão da energia solar em energia térmica para o aquecimento apresenta um desenvolvimento consolidado nos dias atuais e também vem apresentando grande expansão em diversos países. No entanto, a energia solar tem uma participação incipiente na matriz energética brasileira apesar de estudos anteriores indicarem um grande potencial para aplicação dessa fonte de energia no país (Tiba, 2000; Colle e Pereira, 1998).

As perspectivas e oportunidades de aproveitamento do potencial econômico da energia solar dependem de informações confiáveis sobre o potencial disponível e sobre a sua variabilidade em razão de fatores naturais e antropogênicos. O projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) teve como objetivo gerar uma base de dados sobre energia solar e eólica integrada a dados sócio-econômicos que atendessem parte da demanda de informações confiáveis necessárias para o planejamento energético e desenvolvimento de projetos para aproveitamento das fontes alternativas de energia solar e eólica. O principal produto do projeto é uma ferramenta GIS que possibilita a execução de “queries” que permitem a análise de cenários energéticos por meio de relacionamento de dados de disponibilidade energética com variáveis socioeconômicas. Essa ferramenta GIS possibilita relacionar, por exemplo, a disponibilidade de energia solar com o número de habitantes, renda familiar, proximidade de linhas de transmissão e distribuição de eletricidade, rodovias, rios, plantas geradoras, subestações, etc. O acesso público tanto a base de dados quanto à ferramenta GIS está disponível através do sítio <http://swera.unep.net>.

O projeto SWERA foi executado no Brasil por meio de cooperação entre diversas instituições do setor energético e institutos de pesquisa nacionais e internacionais (LABSOLAR/UFSC, CEPTEL, NREL, CBEE, ELETROBRÁS, NOS, etc.) sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos ligado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE) e financiamento do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF).

Este artigo tem como objetivo descrever a metodologia empregada para o levantamento e mapeamento dos recursos de energia solar no território brasileiro no âmbito do projeto SWERA. O artigo apresenta e discute os mapas de irradiação solar global e irradiação solar direta em plano inclinado que apresentam grande aplicação para o desenvolvimento de projetos de sistemas térmicos e fotovoltaicos. Esses mapas fazem parte do “Atlas Brasileiro de Energia Solar” que inclui também os mapas de irradiação solar difusa e de irradiação fotossinteticamente ativa (PAR) juntamente com uma análise detalhada da variabilidade e confiabilidade dos dados e informações apresentadas.

## **2. Metodologia**

Basicamente, existem dois métodos para o levantamento dos recursos de energia solar em uma região extensa como o território brasileiro: a utilização de uma rede de radiômetros distribuídos pelo país em conjunto com técnicas de interpolação dos dados de radiação coletados; e o uso de modelos computacionais para determinação de estimativas da radiação solar incidente por meio de relações empíricas ou da solução da equação de transferência radiativa na atmosfera.

Embora os dados de radiação obtidos através de radiômetros apresentem, na grande maioria das vezes, níveis de confiabilidade superiores àqueles que podem ser obtidos através de modelos radiativos, o mesmo não pode ser generalizado para os resultados de interpolações entre os radiômetros.

Perez et al. (1997) demonstrou que, quando as distâncias entre os radiômetros de uma rede de observação forem superiores a aproximadamente 45 km, os dados interpolados de totais diários de irradiação apresentam níveis de confiabilidade inferiores às estimativas obtidas com modelos computacionais que utilizam imagens de satélite. Resultado semelhante foi obtido em um estudo empregando-se dados coletados em 16 plataformas de coleta de dados (PCD's) operadas na região Sudeste do Brasil pelo CPTEC/INPE (Guarnieri et al., 2006).

Para estimar o fluxo de radiação solar na superfície, os modelos utilizam parametrizações que simulam esses processos físicos na atmosfera. As parametrizações empíricas baseiam-se em dados coletados em superfície ou em satélites que permitem inferir as propriedades óticas da atmosfera e, portanto, a contribuição de cada processo radiativo na transmitância atmosférica total da radiação solar. Os modelos que adotam relações empíricas apresentam validade restrita para a região na qual foram desenvolvidas essas relações. Modelos físicos baseados na solução da equação de transferência radiativa não possuem restrições de aplicabilidade, mas necessitam de informações das variáveis atmosféricas para simular os processos radiativos que atenuam o fluxo de radiação solar.

## 2.1 Modelo BRASIL-SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o uso de informações climatológicas e parâmetros determinados a partir de imagens de satélite. O modelo foi desenvolvido com base no modelo IGMK de autoria de pesquisadores do GKSS Forschungszentrum e descrito por Stuhlman et al. (1990). A obtenção da estimativa do fluxo de radiação solar incidente na superfície é dividida em três etapas: a) tratamento dos dados climatológicos e das imagens de satélite; b) solução da equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de “Dois-Fluxos”; e c) cálculo das componentes da irradiação solar (global, direta e difusa e PAR).

A primeira etapa tem como objetivo preparar os dados de entrada necessários para alimentar o modelo. A base de dados ambientais para alimentar o modelo é constituída de 6 variáveis: temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica, cobertura efetiva de nuvens e elevação da superfície. O modelo BRASIL-SR assume três hipóteses básicas: (i) a cobertura de nuvens é o principal fator de modulação da transmitância atmosférica de modo que os demais processos radiativos na atmosfera podem ser modelados utilizando valores climatológicos das variáveis atmosféricas; (ii) o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as condições atmosféricas de céu claro e de céu completamente encoberto; e (iii) o modelo assume a existência de uma relação linear entre o fluxo de radiação solar global na superfície e o fluxo de radiação refletida para o topo da atmosfera. Dessa forma, o fluxo de radiação solar global incidente na superfície,  $\Phi_g$  é estimado a partir de:

$$\Phi_g = \Phi_0 \{ (\tau_{clear} - \tau_{cloud}) (1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} \} \quad (1)$$

onde  $\Phi_0$  é a radiação solar no topo da atmosfera,  $\tau_{clear}$  e  $\tau_{cloud}$  são as transmitâncias atmosféricas em condições de céu claro e completamente nublado, respectivamente, e  $C_{eff}$  é a cobertura efetiva de nuvens obtida a partir de imagens do satélite GOES de forma independente da calibração do imageador do canal visível. As transmitâncias  $\tau_{clear}$  e  $\tau_{cloud}$  são obtidas por meio da solução da equação de transferência radiativa em 30 camadas atmosféricas e 135 intervalos espectrais. As parametrizações dos processos radiativos na atmosfera estão descritos detalhadamente em Martins (2001).

A irradiação direta horizontal (DNI) é estimada assumindo que a absorção da radiação solar pelas nuvens não é significativa e que a contribuição do espalhamento da radiação solar causado pelas nuvens pode ser adicionada à transmitância atmosférica em condições de céu claro. Dessa forma, a componente direta da irradiação solar é estimada com o uso da expressão abaixo:

$$DNI = \Phi_0 \cdot \tau_{atm-dir} \cdot \tau_{cloud-dir} \quad (2)$$

onde  $\tau_{cloud-dir}$  representa a transmitância das nuvens e  $\tau_{atm-dir}$  é a transmitância de céu claro para a componente direta da irradiação solar. A transmitância  $\tau_{cloud-dir}$  é estimada a partir do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens utilizando a seguinte aproximação:

$$\tau_{cloud-dir} = \frac{(1 - \tau_c)}{(\beta - \tau_c)} \quad (3)$$

onde

$$\tau_c = (CCI + 0,05) \begin{cases} \text{if } CCI < 0.95 \\ \tau_c = 1.0 \\ \text{if } CCI \geq 0.95 \end{cases}$$

e  $\beta$  é o coeficiente de retroespalhamento da radiação pelas gotículas de água presentes na nuvem. A transmitância  $\tau_{atm-dir}$  refere-se aos processos radiativos envolvendo aerossóis e gases atmosféricos em condição de céu claro. Essa transmitância é estimada por meio da resolução da equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de “Dois-Fluxos”.

A estimativa da irradiação solar direta incidente em um plano inclinado em ângulo igual à latitude local foi obtida seguindo a metodologia desenvolvida por Perez et al. (1987). A irradiação solar direta em plano inclinado sofre grande influência do albedo de superfície: tipo de cobertura e uso do solo.

## 2.2 Validação das estimativas de fluxo de energia

O procedimento de validação do modelo BRASIL-SR teve como finalidade assegurar a confiabilidade dos resultados apresentados no Atlas por meio da avaliação dos desvios apresentados pelas estimativas do fluxo de radiação solar em relação aos valores medidos na superfície. Durante o projeto SWERA, a validação do modelo BRASIL-SR foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa foi realizada uma intercomparação de modelos de transferência radiativa adotados pelo Projeto SWERA para o mapeamento do potencial solar nos vários países participantes do projeto. A análise dos resultados dessa etapa mostrou que o modelo BRASIL-SR apresenta um desempenho similar aos demais modelos (Beyer et al., 2004; Martins et al., 2003), sem que nenhum modelo pudesse apresentar uma vantagem estatisticamente significativa sobre os demais.

Na segunda etapa, as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR foram comparadas com valores medidos em estações de superfície pertencente às redes SONDA (CPTEC, 2006) e de estações PCD's operadas pelo CPTEC (CPTEC, 2006). A Tab. 1 detalha os desvios observados e o número de estações envolvidas na tarefa de validação em cada região. Os dados de superfície utilizados na validação foram submetidos a um controle de qualidade com o intuito de permitir uma avaliação mais segura da confiabilidade das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

A partir da análise da Fig. 1, pode-se verificar que o modelo BRASIL-SR apresentou um desempenho similar com uma ligeira superestimativa do fluxo de radiação em todas as regiões geográficas do país. Essa superestimativa apresenta-se ligeiramente maior em condições de céu nublado, isto é, quando o fluxo de radiação solar é mais baixo. O maior desvio médio relativo (rMBE) – razão entre o desvio médio e a irradiância diária média – foi observado para a região Norte. No entanto, a diferença entre os desvios observados nas diferentes regiões não é significativa e pode ter como causas principais a diferença na quantidade de dados e estações de superfície disponíveis em cada região, além das características climáticas de cada região.

A validação das estimativas de irradiação direta foi realizada apenas com dados de superfície coletados nas estações da rede SONDA localizadas em Petrolina (PE), Florianópolis (SC) e São Martinho da Serra (RS). As PCD's e as demais estações SONDA não dispõem de pirheliômetro para medida da componente direta da irradiação solar. A estação SONDA em Brasília está dotada de um pirheliômetro, mas o equipamento apresentou problemas inviabilizando sua utilização.

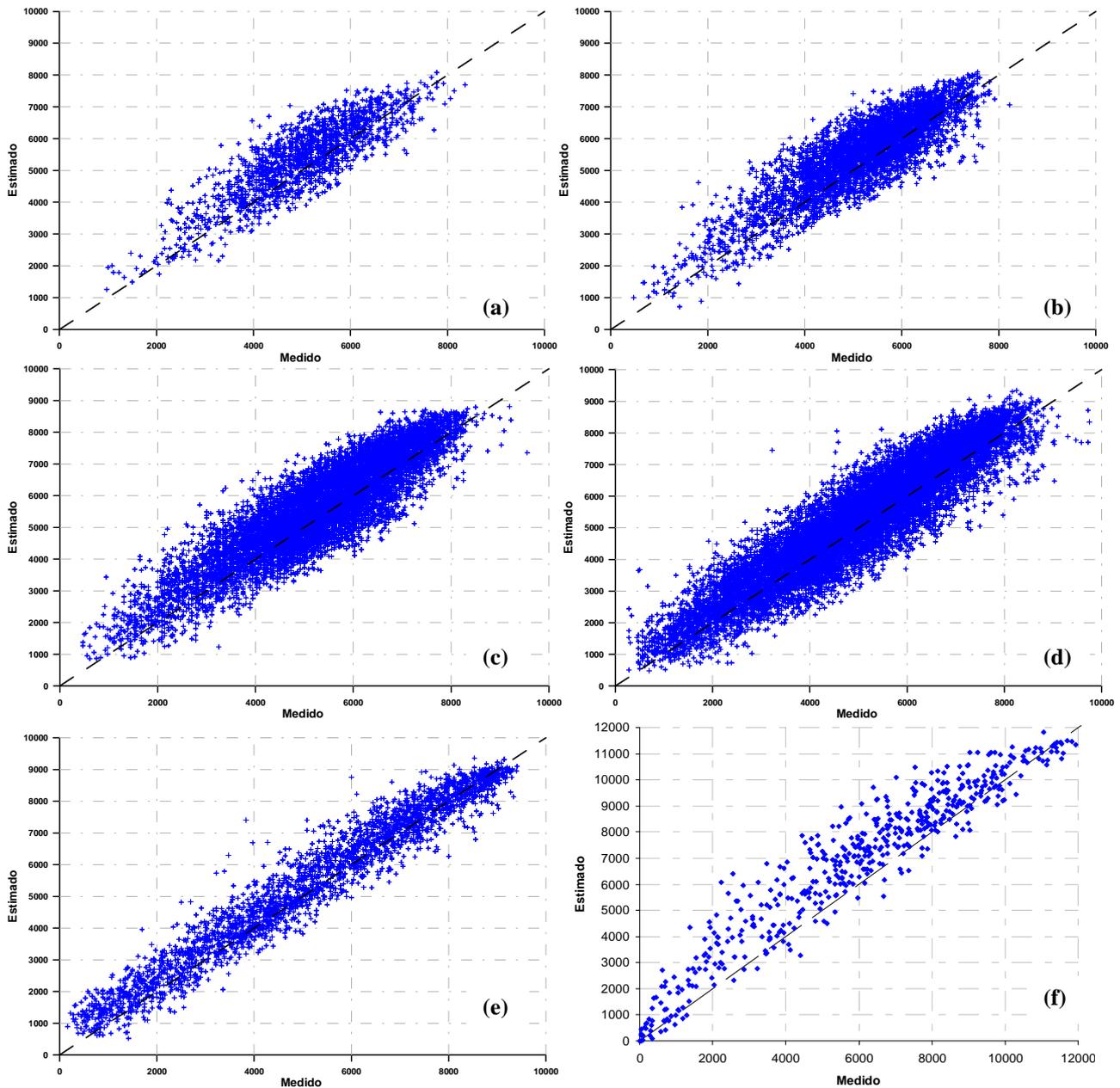


Figura 1. Gráficos de dispersão entre as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação solar global e valores medidos na superfície (em  $\text{Wh/m}^2$ ): (a) na região Norte, (b) na região Nordeste, (c) na região Centro-Oeste, (d) na região Sudeste e (e) na região Sul. O gráfico de dispersão apresentado em (f) mostra a comparação entre valores estimados e medidos (em  $\text{Wh/m}^2$ ) de irradiação solar direta.

Tabela 1. Desvios observados para as estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR em cada uma das regiões brasileiras.

Região Brasileira	MBE* ( $\text{Wh/m}^2$ )	rMBE (%)	rRMSE** (%)	Fator de Correlação	Num. de estações
Norte	353,48	7	15	0,85	11
Nordeste	306,75	6	13	0,97	13
Centro-Oeste	272,11	5	13	0,89	25
Sudeste	249,10	5	14	0,93	38
Sul	259,49	5	12	0,97	11

\* MBE é o desvio médio (Mean Bias Error)

\*\* rRMSE é o desvio quadrático médio relativo (Root Mean Square Error)

A Tab. 2 apresenta os valores dos desvios observados em cada uma das três estações de medição. O desvio médio apresentado é da mesma ordem de grandeza dos desvios apresentados por outros modelos em uso pela comunidade científica (Perez et al., 2002). A estação de Florianópolis apresentou os maiores desvios e supõe-se que isso se deva ao fato de estar localizada em área urbana. O gráfico apresentado na Fig. 1(f) apresenta a comparação entre valores medidos e estimados da irradiação direta medida nas 3 estações SONDA.

Tabela 2. Desvios apresentados pelas estimativas de irradiação direta fornecidas pelo modelo BRASIL-SR em relação a três estações de referência da rede SONDA.

Estação	MBE (Wh/m <sup>2</sup> )	rMBE (%)	rRMSE (%)	Fator de Correlação
São Martinho do Serra (RS)	6713,2	13	20	0,96
Florianópolis (SC)	5045,8	23	29	0,95
Petrolina (PE)	5655,6	13	18	0,96

### 3. Mapas Solarimétricos

A Fig. 2 apresenta os mapas de média anual e sazonal da irradiação solar global no território brasileiro utilizando dados de satélite para o período de 1995 a 2005. Pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta uma ampla uniformidade, apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil. O valor máximo de irradiação global diária – cerca de 6,5 kWh/m<sup>2</sup> – ocorre no norte do estado da Bahia. Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano (cerca de 300 mm/ano) e a média anual de nebulosidade mais baixa do Brasil (INMET, 2006). O menor total diário da irradiação solar global – cerca de 4,25 kWh/m<sup>2</sup> – ocorre no litoral norte de Santa Catarina que é caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano e a média anual de cobertura de nuvens mais elevada do país.

Os mapas sazonais da irradiação global diária mostram que a região Norte recebe menor incidência de radiação solar durante o verão do que a região Sul apesar de sua localização próxima ao Equador. Isso se deve à climatologia da região amazônica que apresenta nebulosidade e precipitação elevadas no verão devido à forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Nos meses de Inverno, a Amazônia recebe maior irradiação solar global do que o Sul do país uma vez que o decréscimo natural da incidência de irradiação solar no topo da atmosfera nessa estação é compensado por uma menor nebulosidade associada ao deslocamento da ZCIT em direção ao hemisfério norte. Esse deslocamento da ZCIT associado à incursão dos ventos Alísios provenientes do Oceano Atlântico é responsável por altas taxas de precipitação no oeste da região Amazônica mesmo durante o período de estiagem entre julho e setembro, de modo que essa região apresenta as menores irradiações da região Norte durante todo o ano.

A incursão dos ventos Alísios também explica a menor irradiação solar no litoral e região costeira do Nordeste Brasileiro. Os valores máximos de irradiação solar são observados a oeste da região Nordeste, incluindo o norte de Minas Gerais, o nordeste de Goiás e o sul de Tocantins. Durante todo o ano, a influência da Alta Tropical, que está associada ao anticiclone tropical do Atlântico Sul, confere um regime estável de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação solar para essa região semi-árida.

Na Região Sul são observados os menores valores de irradiação global no Brasil, notadamente na costa norte do estado de Santa Catarina, litoral do Paraná e litoral sul de São Paulo. A irradiação solar global apresenta maior variação inter-sazonal nessa região devido às características de clima temperado e a influência de sistemas frontais que contribuem para o aumento da nebulosidade, principalmente durante os meses de Inverno.

A região central do Brasil recebe maior incidência de radiação solar durante as estações secas, particularmente entre os meses de julho e setembro, quando a precipitação é baixa e o número de dias com céu claro é maior. No entanto, a concentração de aerossóis lançados à atmosfera em eventos de queimadas provoca uma variabilidade de difícil previsão. Os aerossóis emitidos em eventos

de queima de biomassa apresentam alta absorção da radiação solar, podendo reduzir significativamente a irradiação solar incidente na superfície em função da sua concentração na atmosfera. A concentração desses aerossóis dependerá da proximidade dos focos de queimada e das condições meteorológicas que influenciam no transporte e dispersão do material particulado presente na atmosfera. Os resultados apresentados abaixo foram obtidos utilizando um perfil atmosférico de aerossóis padrão para áreas continentais que não contempla a variabilidade decorrente das queimadas na região.

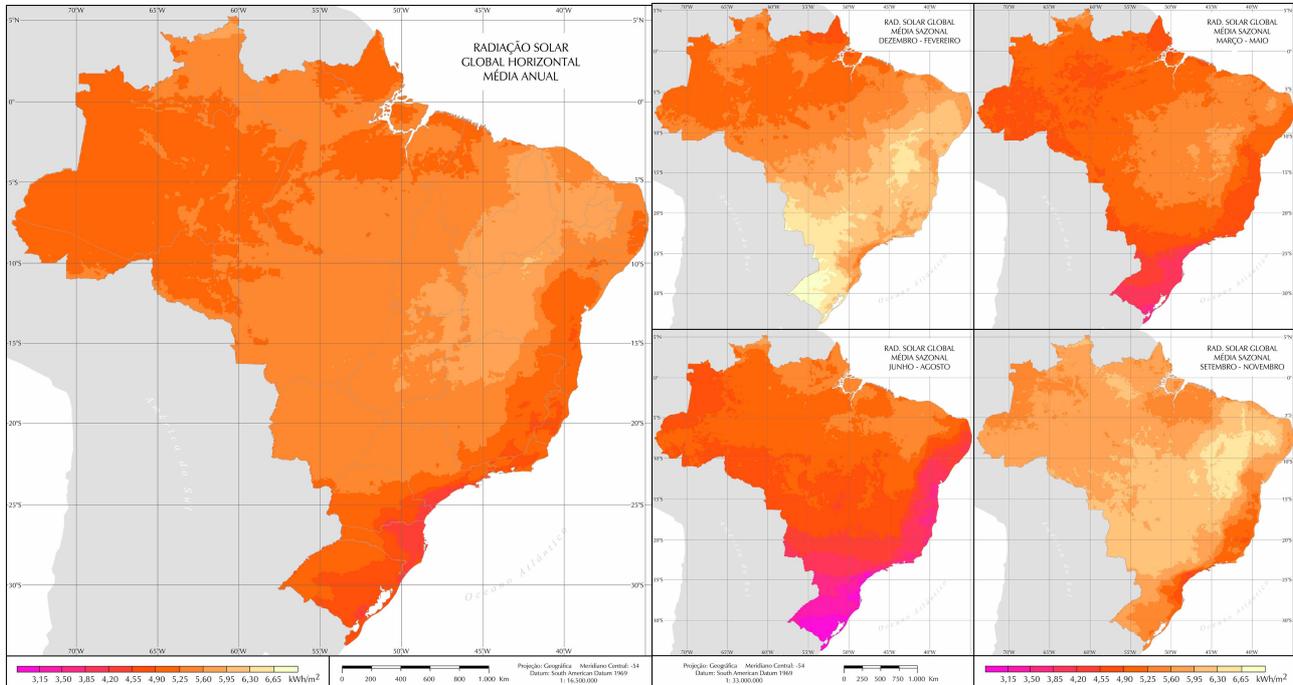


Figura 2. Mapas com médias anual e sazonais do total diário de irradiação solar global no Brasil.  
Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

A Fig. 3 mostra os mapas das médias anual e sazonais da irradiação solar diária incidente sobre um plano com inclinação igual à latitude do local em consideração. Não levando em conta a topografia local, essa configuração é a que possibilita a máxima captação da energia solar incidente. A irradiação solar sobre o plano inclinado apresenta forte influência do albedo de superfície que está relacionado ao uso e o tipo de cobertura do solo. Os mapas apresentam os mesmos padrões descritos na análise dos mapas de irradiação solar global. Pode-se verificar que os maiores níveis de irradiação solar no plano inclinado ocorrem na faixa que vai do Nordeste ao Sudeste durante a Primavera e os menores valores em todas as regiões do Brasil ocorrem durante os meses de Inverno.

A Fig. 4 apresenta os mapas de variabilidade anual e sazonais da irradiação solar global no território brasileiro. pode-se notar que toda a região amazônica e a parte setentrional das regiões Nordeste e Centro-Oeste, incluindo o nordeste do estado de São Paulo e o oeste de Minas Gerais, apresentam menor variabilidade ao longo do ano – menor de 25%. Essas regiões apresentam diferentes características climáticas que reduzem a variabilidade da irradiação solar incidente na superfície ao longo do ano como por exemplo a baixa nebulosidade durante todo o ano na região semi-árida do Nordeste e a elevada nebulosidade durante o Verão na região amazônica. Grande parte da região Sul e o leste da região Sudeste apresentaram uma variabilidade anual entre 30 e 35% causada principalmente pela penetração das massas de ar polares durante a estação seca do ano (maio a outubro). Os maiores valores de variabilidade foram observados na região costeira desde Santa Catarina até São Paulo. Essa região coincide com a área de maior nebulosidade média anual do Brasil, conforme dados das normais climatológicas apresentados pelo INMET (2006).

As variabilidades sazonais apresentam o mesmo padrão descrito para a variabilidade anual. Toda a área centro-norte do país, incluindo a região amazônica, o cerrado, a região semi-árida do Nor-

deste, oeste de Minas Gerais e noroeste de São Paulo, apresenta as menores variabilidades sazonais. Por outro lado, a área costeira das regiões Sul e Sudeste apresenta a maior variabilidade em todas as estações do ano. Vale mencionar que a área central do Brasil e a região amazônica apresentam menor variabilidade durante o Inverno e maior variabilidade durante o Verão. Esse comportamento reflete a variação da nebulosidade ao longo do ano. Durante o Inverno ocorrem poucas chuvas em toda essa região e o número de dias com céu claro é maior, reduzindo a variabilidade da irradiação solar na região. A presença de maior nebulosidade durante o Verão acarreta uma variabilidade maior da irradiação solar durante esse período.

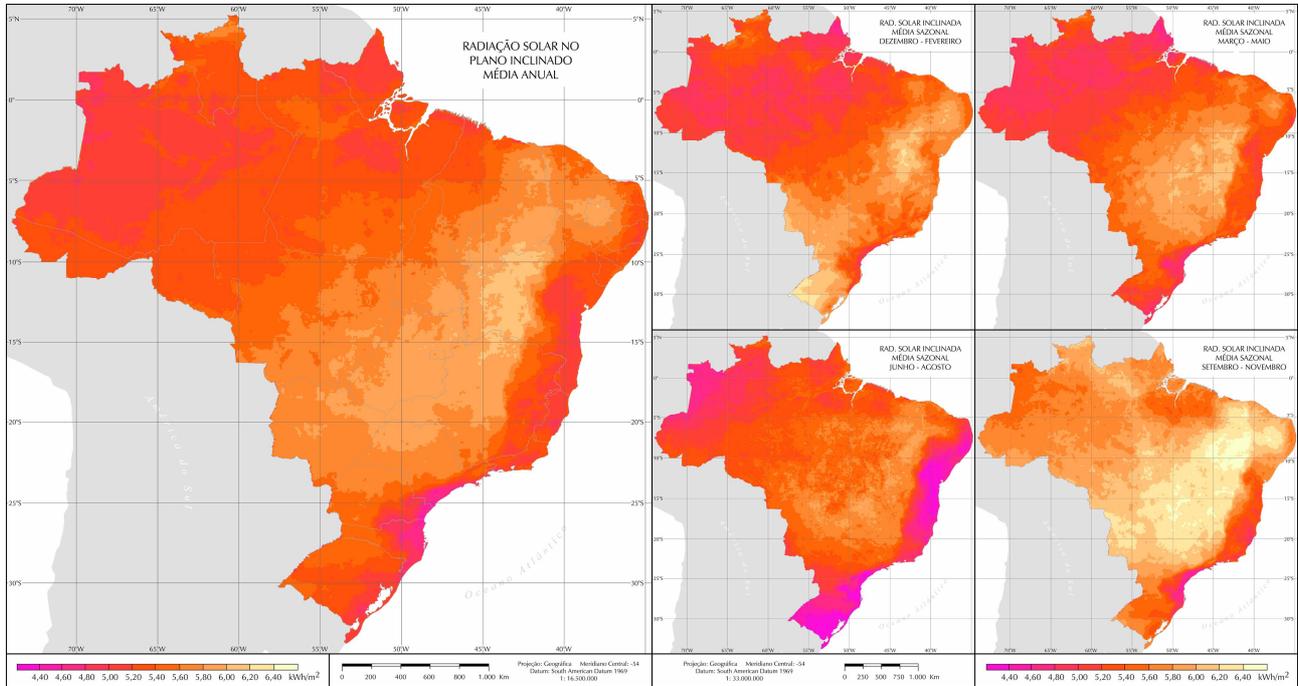


Figura 3. Mapas com médias anual e sazonais do total diário de irradiação solar incidente em um plano inclinado com ângulo igual à latitude local. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

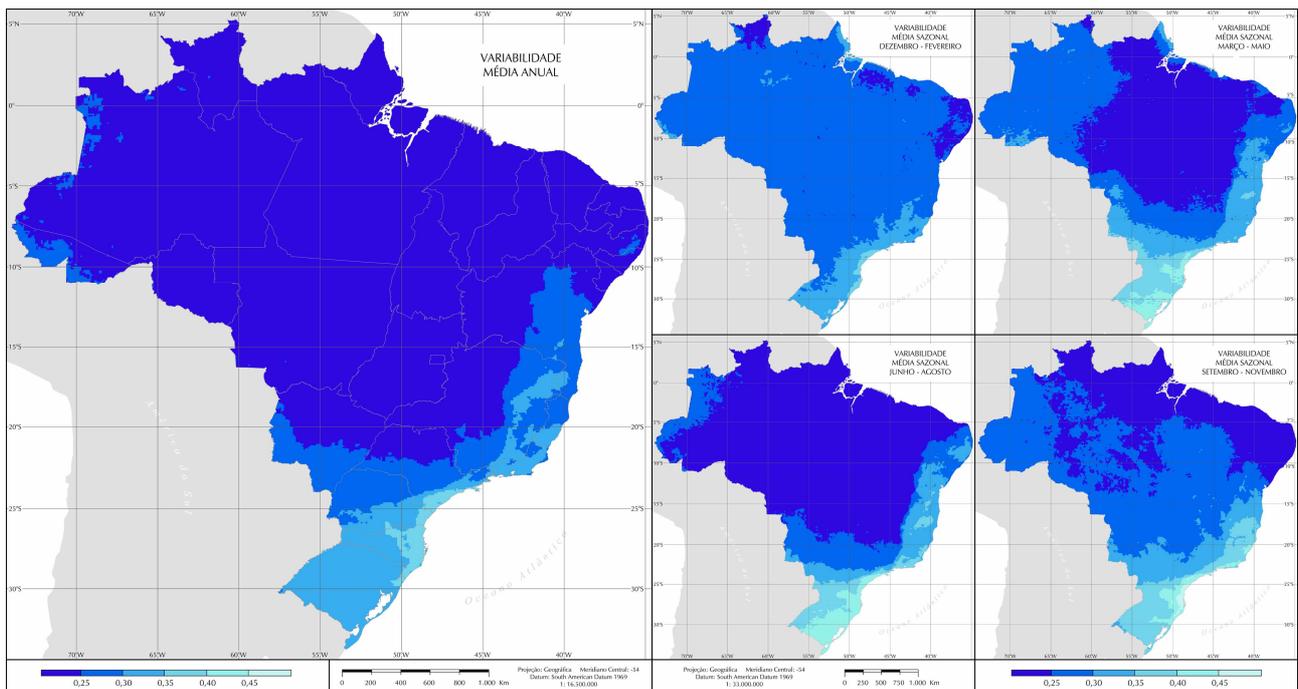


Figura 4. Mapas de variabilidade anual e sazonal da irradiação solar global no território brasileiro. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

A Fig. 5 apresenta os valores médios de irradiação solar global em cada uma das regiões geográficas do Brasil e permite a comparação da variabilidade inter-anual das médias anuais do total diário de irradiação solar global incidente na superfície para cada uma das regiões brasileiras no período entre 1995 e 2005. A região Nordeste é a que apresentou menor variabilidade inter-anual (entre 5,7 e 6,1kWh/m<sup>2</sup>), seguida pela região Norte (entre 5,2 e 5,8kWh/m<sup>2</sup>). No período de 10 anos analisado, a região Sul apresentou maior variabilidade inter-anual, com as médias anuais variando entre 4,6 e 5,6kWh/m<sup>2</sup>.

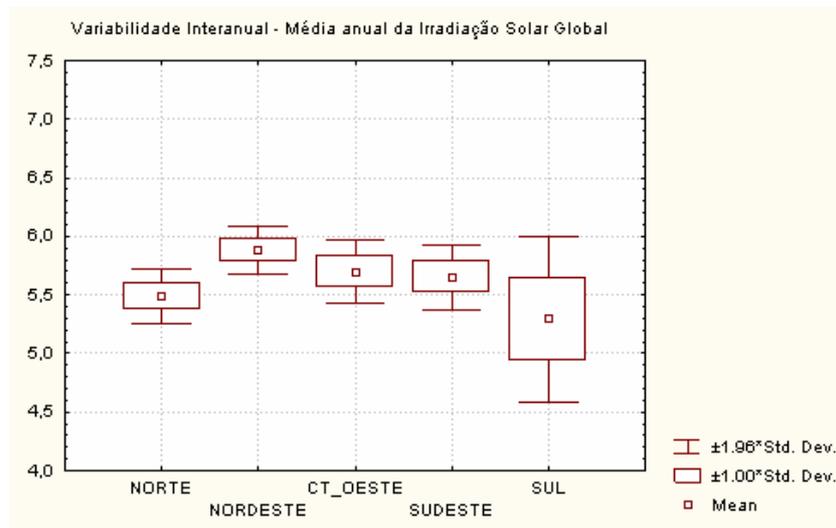


Figura 5. Variabilidade da média anual de irradiação solar no período 1995 a 2005 cada uma das regiões geográficas do Brasil

#### 4. Conclusões

O Atlas Brasileiro de Energia Solar foi produzido no âmbito do projeto SWERA com objetivo de suprir a demanda de informações necessárias para impulsionar o desenvolvimento de projetos para aproveitamento dessa fonte de energia. A metodologia empregada para a produção dos mapas mostrou-se adequada e a etapa de validação das estimativas de irradiação solar global mostrou que o modelo BRASIL-SR apresenta desempenho similar aos demais modelos de transferência radiativa utilizados no projeto SWERA e que fornece estimativas de boa confiabilidade quando comparadas com dados de superfície (rMBE de 6% e rRMSE de 13%, aproximadamente). A análise dos mapas mostra que o fluxo de radiação solar global incidente no território brasileiro é superior ao de países da União Européia onde projetos para aproveitamento de recursos solares são disseminados (EDDSR, 2005). As características climáticas de cada região geográfica do país apresentam forte influência na variabilidade sazonal dos recursos energéticos solares, no entanto, a média do total diário de irradiação solar global apresenta uma uniformidade bastante grande em todo o território brasileiro. A região semi-árida do Nordeste brasileiro apresentou os maiores médias de irradiação solar global (aproximadamente 6,5kWh/m<sup>2</sup>), enquanto que o litoral dos estados de Santa Catarina e Paraná apresentou os menores níveis de irradiação solar incidente na superfície – cerca de 4,25kWh/m<sup>2</sup>.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP (projeto SONDA – 22.01.0569.00), ao CNPq pelo suporte financeiro a todos os bolsistas envolvidos na realização deste projeto e ao PNUMA/GEF pelo suporte financeiro ao desenvolvimento do projeto SWERA.

## REFERÊNCIAS

- Beyer, H. G.; Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Colle, S.; Perez, R.; Schillings, C.; Mannstein, H.; Meyer, R.. Assessing satellite derived irradiance information for South America within the UNEP resource assessment project SWERA. Proceedings of the 5th ISES Europe Solar Conference, held in Freiburg, Germany. 2004.
- CPTEC/INPE, Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: PNUMA, 2006.
- Colle, S.; Pereira, E. B. Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998.
- EDDSR, European Database for Daylight and Solar Radiation, 2005. [online]:<http://www.satellite-light.com>.
- Goldemberg, J.; Villanueva, L. D. Energia, meio ambiente e desenvolvimento. São Paulo: EDUSP, 225p., 2003.
- Guarnieri, R. A.; Martins, F. R.; Silva, S. A. B.; Pereira, E. B. Avaliação de estimativas de radiação solar incidente baseadas em extrapolação e interpolação na região sudeste do Brasil. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia realizado em Florianópolis, 2006.
- Martins, F. R.; Pereira, E. B., Abreu, S. L.; Ruther, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. ISBN: 978-85-17-00030-0. São José dos Campos: PNUMA, 2006.
- Martins, F. R.; Pereira, E. B., Abreu, S. L.; Beyer, H. G.; Colle, S.; Perez, R.; Heinemann, D. Cross-validation of the satellite radiation transfer models during SWERA project in Brazil. Proceedings of the ISES World Congress, held in Goteborg, Sweden. 2003.
- Martins, F. R. Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. Tese de Doutorado apresentada no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, Agosto 2001.
- Mints, P. Analysis of worldwide markets for photovoltaic: products and five-year application forecast, Navigant Consulting, 1-28, 2006.
- Perez, R.; Ineichen, P.; Moore, K.; Kmiecik, M.; Chain, C.; George, R.; Vignola, M. A new operational model for satellites irradiances: description and validation. Solar Energy, 73(5): 307-317, 2002.
- Perez, R.; Seals, R.; Zelenka, A. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. Solar Energy, 60(2): 89-96, 1997.
- Perez, R. Seals, R.; Ineichen, P.; Stewart, R.; Menicucci, D. A new simplified version of the Perez Diffuse irradiance model for tilted surfaces, Solar Energy, 39: 221-232, 1987.
- 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. J. Applied Meteorology, 29(7): 586-603, 1990.
- Tiba, C. Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

## SOLAR ENERGY RESOURCE ASSESSMENT IN BRAZIL USING RADIATIVE TRANSFER MODEL BRASIL-SR

**Abstract.** *This paper aims at describing the methodology employed to produce the Brazilian Solar Atlas. A short description of BRASIL-SR transfer model is presented, followed by the validation tasks results and maps for global solar irradiation and solar irradiation on a tilted plan. The Atlas is a product of SWERA project, coordinated by CPTEC/INPE in Brazil. The solar maps show that any place in Brazil presents solar irradiation larger than the most of European countries where projects to take advantage of solar resources are been developed...*

**Key words:** Solar Energy, Radiative transfer, atmospheric modeling, climatological data, satellite images.