

## MAPEAMENTO DOS RECURSOS DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL

*Fernando R. Martins<sup>1</sup>, Enio B. Pereira<sup>1</sup>, Ricardo A. Guarnieri<sup>1</sup>, Cristina S. Yamashita<sup>1</sup>, Sheila A. B. Silva<sup>1</sup>, Rafael C. Chagas<sup>1</sup>, Hugo J. Corrá<sup>1</sup>, Helton P. Souza<sup>1</sup>, Samuel Luna de Abreu<sup>2</sup>*

**RESUMO:** Este artigo tem como objetivo apresentar a metodologia empregada para a produção dos mapas do fluxo de radiação global apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar. O artigo descreve o modelo de transferência radiativa empregado, a etapa de validação das estimativas do fluxo de radiação solar e os mapas produzidos. A etapa de validação mostrou que o modelo BRASIL-SR apresenta bom desempenho fornece estimativas de boa confiabilidade. A análise dos mapas mostram que o fluxo de radiação solar global incidente no território brasileiro são superiores aos da maioria dos países da União Européia onde projetos para aproveitamento de recursos solares são amplamente disseminados. As características climáticas de cada região geográfica do país apresenta forte influência na disponibilidade de recursos energéticos solares.

**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. The Atlas is a product of SWERA project, coordinated by CPTEC/INPE in Brazil. The solar maps shows 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.

**Palavras-chave:** transferência radiativa, energia solar, projeto SWERA.

### INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental. A energia solar é uma das alternativas naturais para atender a essa demanda energética. Atualmente, a tecnologia energética que apresenta maior crescimento no mundo são os sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica apesar de seu ainda elevado custo [1]. A conversão da energia solar em energia térmica para o aquecimento já 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 [2,3]. As perspectivas e oportunidades de aproveitamento do potencial econômico relacionado à exploração comercial da energia solar dependem de informações confiáveis sobre o potencial disponível e sobre a sua variabilidade em razão de fatores naturais e

---

<sup>1</sup> Divisão de Clima e Meio Ambiente – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Caixa Postal 515. CEP: 12227-010. email: [fernando@dge.inpe.br](mailto:fernando@dge.inpe.br), [eniobp@cptec.inpe.br](mailto:eniobp@cptec.inpe.br).

<sup>2</sup> Laboratório de Energia Solar – Departamento de Energia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Universitário Trindade. CEP: 12227-010. email: [samuel@umc.ufsc.br](mailto:samuel@umc.ufsc.br)

antropogênicos. O Atlas Brasileiro de Energia Solar, produto do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), foi produzido com objetivo de suprir parte dessa demanda de informações e alavancar o desenvolvimento de projetos para aproveitamento da energia solar. A execução do SWERA teve o patrocínio do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) e GEF (Fundo Global para o Meio Ambiente) e, no Brasil, foi coordenado pelo CPTEC/INPE que assumiu a tarefa de elaborar o Atlas, juntamente com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC).

Este artigo tem como objetivo apresentar a metodologia empregada para a produção dos mapas do fluxo de radiação global apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar. O artigo descreve o modelo de transferência radiativa empregado, a etapa de validação das estimativas do fluxo de radiação solar os mapas produzidos. A preparação e desenvolvimento dos demais mapas de contidos no Atlas estão discutidos em outros trabalhos a serem apresentados neste evento.

## MODELO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

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. O modelo assume três hipóteses básicas para determinação das estimativas do fluxo de radiação solar: (a) a cobertura de nuvens é o principal fator de modulação da transmitância atmosférica de modo que valores climatológicos das variáveis atmosféricas são utilizados para estimar as demais propriedades óticas da atmosfera; (b) o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas: céu claro e céu completamente encoberto; e (c) a existência de uma relação linear entre o fluxo de radiação solar na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera. Dessa forma, o fluxo de radiação solar global incidente na superfície,  $\Phi_g$ , pode ser obtido 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. As parametrizações dos processos radiativos na atmosfera adotados no modelo estão descritos detalhadamente em [4].

## CONFIABILIDADE DAS ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

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 mostraram que o modelo BRASIL-SR apresenta um desempenho similar aos demais modelos [5], sem que nenhum modelo pudesse apresentar uma vantagem estatisticamente significativa sobre os demais.

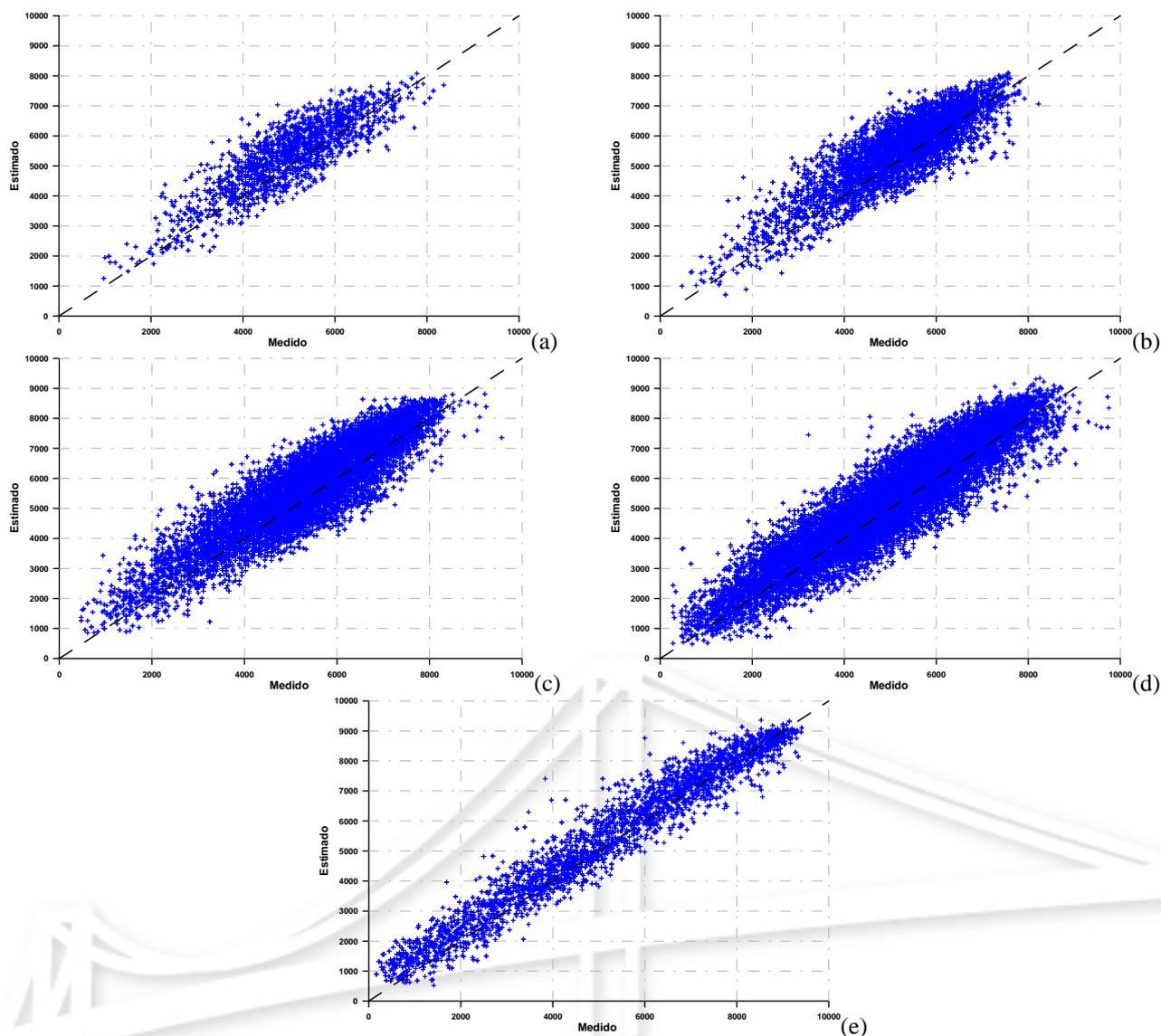
Na segunda etapa, as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR foram comparadas com valores medidos em estações de superfície pertencente às redes SONDA [6] e de estações PCD's operadas pelo CPTEC [7]. A Tabela 1 detalha os desvios observados e o número de estações envolvidas na tarefa de validação 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 Figura 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.

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

Região Brasileira	MBE* (Wh/m <sup>2</sup> )	Desvio-padrão do MBE	rMBE (%)	rRMSE** (%)	Fator de Correlação	Número de estações
Norte	353,48	640,29	0,07	0,15	0,85	11
Nordeste	306,75	631,10	0,06	0,13	0,97	13
Centroeste	272,11	669,80	0,05	0,13	0,89	25
Sudeste	249,10	662,74	0,05	0,14	0,93	38
Sul	259,49	546,71	0,05	0,12	0,97	11

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



**Figura 1.** Gráficos de dispersão entre as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação solar global e valores medidos em superfície (a) na região Norte, (b) na região Nordeste, (c) na região Centroeste, (d) na região Sudeste e (e) na região Sul.

## MAPAS SOLARIMÉTRICOS

A partir da análise dos mapas apresentados na Figura 2 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  $6,5\text{kWh/m}^2$  – ocorre no norte do estado da Bahia. Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano (aproximadamente  $300\text{mm/ano}$ ) e a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil [8]. O menor total diário da irradiação solar global – cerca de  $4,25\text{kWh/m}^2$  – 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.

As médias 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 à linha do Equador. Durante os meses de Inverno, ocorre o inverso e a região amazônica recebe maior irradiação solar global. Isso se deve às características climáticas da região amazônica que apresenta fração de cobertura de nuvens e precipitação elevadas durante o verão devido à forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O decréscimo natural da incidência de irradiação solar no topo da atmosfera que ocorre no inverno em decorrência de fatores astronômicos é compensado na região amazônica por uma menor nebulosidade associada ao deslocamento da ZCIT em direção ao hemisfério norte. O deslocamento da ZCIT associado à incursão dos ventos Alísios provenientes do Oceano Atlântico é responsável por altas taxas de precipitação (cerca de 1100mm) no noroeste da região Amazônica mesmo durante o período de estiagem entre julho e setembro, de modo que o oeste do estado do Amazonas apresenta as menores irradiações solares 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. A irradiação solar global apresenta maior variação inter-sazonal na Região Sul devido às características de clima temperado e a influência de sistemas frontais associados ao Anticiclone Polar Antártico 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.

## 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 [4]. As

características climáticas de cada região geográfica do país apresenta 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.

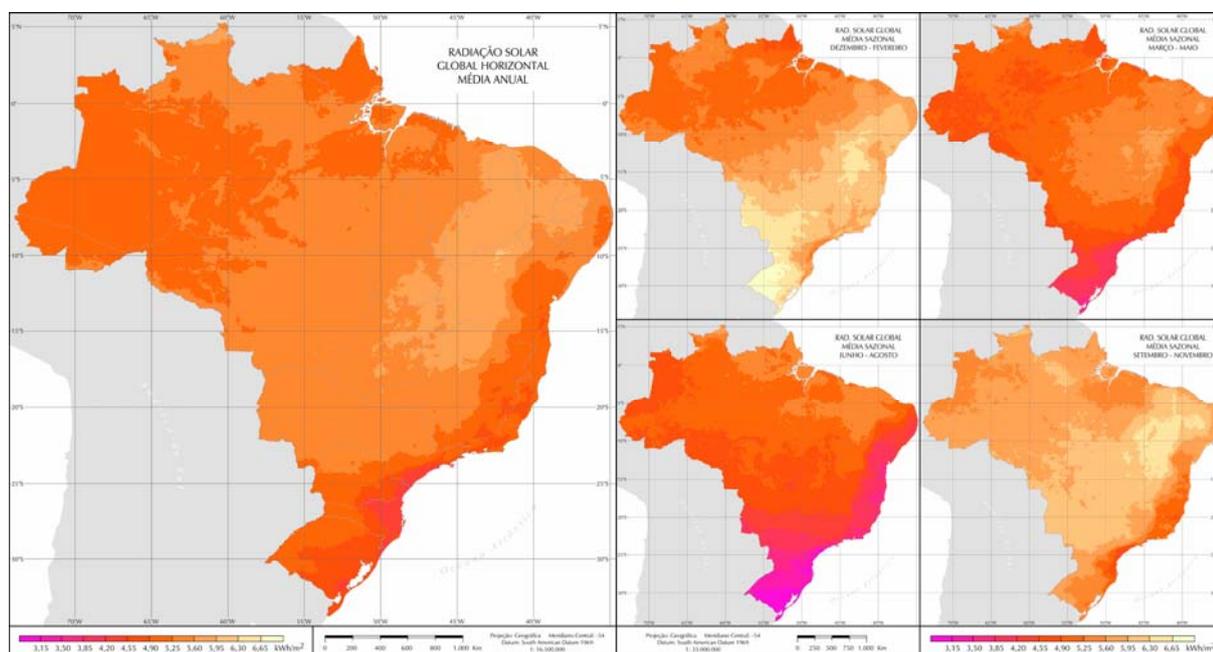


Figura 2. Mapas com médias anual e sazonais do total diário de irradiação solar no Brasil.

## 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 BIBLIOGRÁFICAS

1. Mints, P. *Analysis of worldwide markets for photovoltaics: products and five-year application forecast*, Navigant Consulting (2006), 1-28.
2. Tiba, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.
3. Colle, S.; Pereira, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície**. Brasília: INMET, 1998.
4. Martins, F. R. Et al. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. **Solar Energy**, doi:10.1016/j.solener.2006.07.009, 2006.
5. Beyer, H. G. et al. **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.
6. CPTEC/INPE. Descrição da rede SONDA e acesso à base de dados coletados. [online] [www.cptec.inpe.br/sonda](http://www.cptec.inpe.br/sonda), 2006.
7. CPTEC/INPE. Descrição da rede de PCD's e acesso à base de dados coletados. [online] <http://tempo.cptec.inpe.br:9080/PCD/>, 2006.
8. (INMET, 2004). **Normais Climatológicas para o Brasil**. [online] [www.inmet.gov.br/](http://www.inmet.gov.br/).