

## Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA

Fernando Ramos Martins<sup>1</sup>  
Enio Bueno Pereira<sup>1</sup>  
Samuel Luna de Abreu<sup>2</sup>  
Sergio Colle<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{fernando, enio}@dge.inpe.br

<sup>2</sup>Laboratório de Energia Solar/Universidade Federal de Santa Catarina –  
LABSOLAR/UFSC.  
Caixa Postal 476 - 88040-900 - Florianópolis - SC, Brasil  
{samuel, colle}@emc.ufsc.br

**Abstract.** The SWERA project is an international project financed by GEF/UNEP which aims at providing a consistent and easily accessible database to increase confidence levels of investors and influence decision centers to foster the insertion of renewable energies on the energy matrix of selected pilot countries. The project is now at the stage of formatting information, validating of energy resource models, and GIS data processing. Solar energy resource maps are generated for Brazil and South America using the radiative transfer model BRASIL-SR. This paper presents the methodology developed to produce the solar maps and discuss the solar maps obtained for the year 2000.

**Palavras-chave:** remote sensing, environmental data, GIS, sensoriamento remoto, coleta de dados ambientais, GIS.

### 1. Introdução

Nos dias de hoje, a qualidade de vida está fortemente ligado ao consumo de energia e, como consequência desse fato, estima-se um crescimento anual da demanda de energia em 4% aa nos países em desenvolvimento nos próximos 20 anos (Goldemberg, 1998). Esse aumento da demanda energética em conjunto com a crescente preocupação das consequências ambientais do consumo de combustíveis fósseis (IPCC, 2001) estão impulsionando a pesquisa, o desenvolvimento e o uso de tecnologias alternativas de geração de energia utilizando fontes renováveis que produzam menor impacto ambiental. Uma das principais barreiras encontradas pelos órgãos governamentais e não-governamentais; investidores e empresas ligadas ao setor de energia é a falta de informações confiáveis sobre os recursos renováveis disponíveis que permitam avaliar riscos associados à fatores climático-ambientais envolvidos em projetos de utilização dessas fontes de energia.

O projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) tem como objetivo fundamental facilitar a inclusão de fontes de energia renováveis na matriz energética de um grupo de países-piloto selecionados para esse projeto. Atualmente são treze países envolvidos no projeto divididos em três grupos regionais: África, América Latina e Ásia. O Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) por meio da

Divisão de Clima e Meio Ambiente (DMA) é responsável pela coordenação das atividades do projeto para o Brasil e para a América Latina. As metas principais estabelecidas para o desenvolvimento do projeto foram:

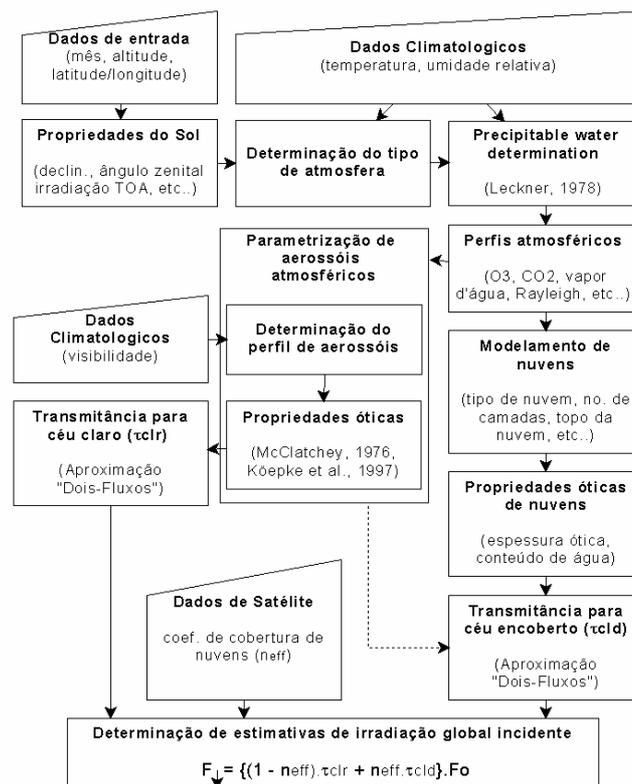
- desenvolvimento uma base de dados consistente, confiável e acessível a diversos setores da sociedade (governamentais e não governamentais, investidores e empresas privadas do setor energético, instituições de pesquisa e universidades) com o intuito de disseminar informação embasada no conhecimento científico sobre a extensão e localização de regiões com maior potencial de aproveitamento dessas fontes renováveis de energia;
- integração da base de dados dos recursos energéticos renováveis com outras bases de informações tais como infraestrutura disponível, dados sócio-econômicos, parâmetros climático e ambientais a fim de reduzir as incertezas associadas com o planejamento e investimento no uso de fontes de energia solar e eólica.

Este trabalho enfoca nas atividades e resultados do projeto SWERA relacionados ao levantamento dos recursos de energia solar no território brasileiro. Diversos modelos computacionais foram adotados no âmbito do projeto SWERA para obtenção dos mapas de irradiação solar para as três regiões atendidas pelo projeto. O modelo BRASIL-SR foi utilizado para o desenvolvimento do projeto no Brasil e América do Sul. Uma etapa de validação e intercomparação das estimativas de irradiação solar fornecidas por cada um dos modelos foi realizada com a finalidade de estabelecer as incertezas associadas à cada um dos modelos. Dados de superfície coletados em Caicó(PE), Florianópolis(SC) e Balbina(AM) foram utilizados nesta etapa e verificou-se que o modelo BRASIL-SR apresentou desempenho similar (Beyer *et al.*, 2004, Martins *et al.*, 2003) aos demais modelos e que existe uma concordância entre as estimativas fornecidas por cada um deles. Maiores detalhes sobre a etapa de intercomparação de modelos ou sobre o projeto podem ser acessados no site: [www.cptec.inpe.br/swera](http://www.cptec.inpe.br/swera).

## 2. Modelo BRASIL-SR

Os mapas de irradiação solar para o território brasileiro e América do Sul foram obtidos com o uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR desenvolvido pelo INPE em parceria com o LABSOLAR/UFSC. Atualmente o modelo encontra-se operacional no LABSOLAR processando os dados solares para a América Latina e Brasil. A obtenção de uma estimativa da radiação solar incidente na superfície utilizando o modelo BRASIL-SR está atrelada a três conjuntos principais de informações: a) valores climatológicos de temperatura, visibilidade, umidade relativa e albedo de superfície; b) dados digitais extraídos de imagens de satélite; e, c) aplicação do “Método de Dois-Fluxos” (Martins, 2001) para solução da equação de transferência radiativa na atmosfera. A Figura 1 mostra o diagrama em blocos dos processos pelo modelo. As bases de dados climatológicos de temperatura e visibilidade foram desenvolvidas a partir da compilação e análise geoestatística dos dados de todas as estações de superfície na América do Sul disponíveis na base de dados “Global Surface Summary of Day Data” mantida pelo National Climatic Data Center. O banco de dados de umidade relativa foi desenvolvido a partir da interpolação de dados obtidos junto à “International Research Institute for Climate Prediction” para toda a América do Sul. A base de dados de albedo de superfície foi gerada a partir das grades mensais na resolução 1° x 1° disponibilizadas pelo “Distributed

Active Archive Center – Goddard Space Flight Center”. Os valores de altitude para todo o território da América do Sul foram obtidos pela manipulação da base de dados GTOPO30 produzida pelo Earth Resources Observation System Data Center (EROS) mantido pelo U.S Geological Survey. Os valores do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens ( $n_{eff}$ ) são obtidos após manipulação e análise estatística das imagens de satélite (GOES-8 e GOES-12) e descrevem dois efeitos causados pela presença de nuvens: a fração do céu contaminado por nuvens e a profundidade ótica das mesmas.



**Figura 1.** Fluxograma do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR.

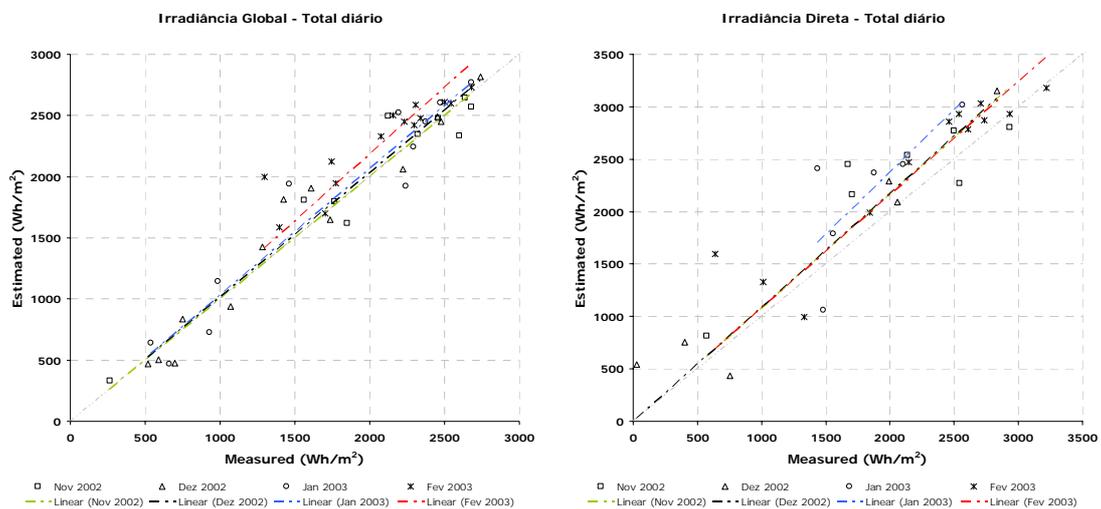
O modelo assume que fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas céu claro e céu encoberto (Martins, 2001; Pereira et al., 2000). O modelo assume, também, a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera, descrita matematicamente por:

$$F_{\downarrow} = F_0 \left\{ \tau_{clear} \cdot (1 - n_{eff}) + n_{eff} \tau_{cloud} \right\} \quad (1)$$

onde  $F_{\downarrow}$  é fluxo de radiação solar incidente na superfície,  $F_0$  é a radiação incidente no topo da atmosfera. A radiação solar incidente na superfície é estimada através da Equação (1) a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à

transmitância atmosférica em condição de céu claro,  $\tau_{clear}$ , e a segunda refere-se à condição de céu encoberto,  $\tau_{cloud}$ . As duas transmitâncias podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos e a aproximação de “Dois-Fluxos” para solução da equação de transferência radiativa. A natureza aleatória do fluxo de radiação solar incidente na superfície em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura de nuvens ( $n_{eff}$ ).

A Figura 2 apresenta a comparação de valores estimados e medidos de irradiação solar global e difusa para a estação de superfície localizada em Caicó e Florianópolis. Os desvios BIAS e RMSE relativos a valor médio medido também estão indicados para cada caso. Conforme mencionado anteriormente, os desvios observados pelo modelo BRASIL-SR são da mesma ordem dos desvios encontrados nos demais modelos em uso no projeto SWERA (Martins *et al.*, 2003).



**Figura 2.** Comparação valores de irradiação solar incidente na superfície medidos e estimados pelo modelo BRASIL-SR: (a) global e (b) direta. As linhas tracejadas coloridas representam a regressão linear entre os valores medidos e estimados em cada mês.

### 3. Mapas do fluxo de radiação solar no território brasileiro

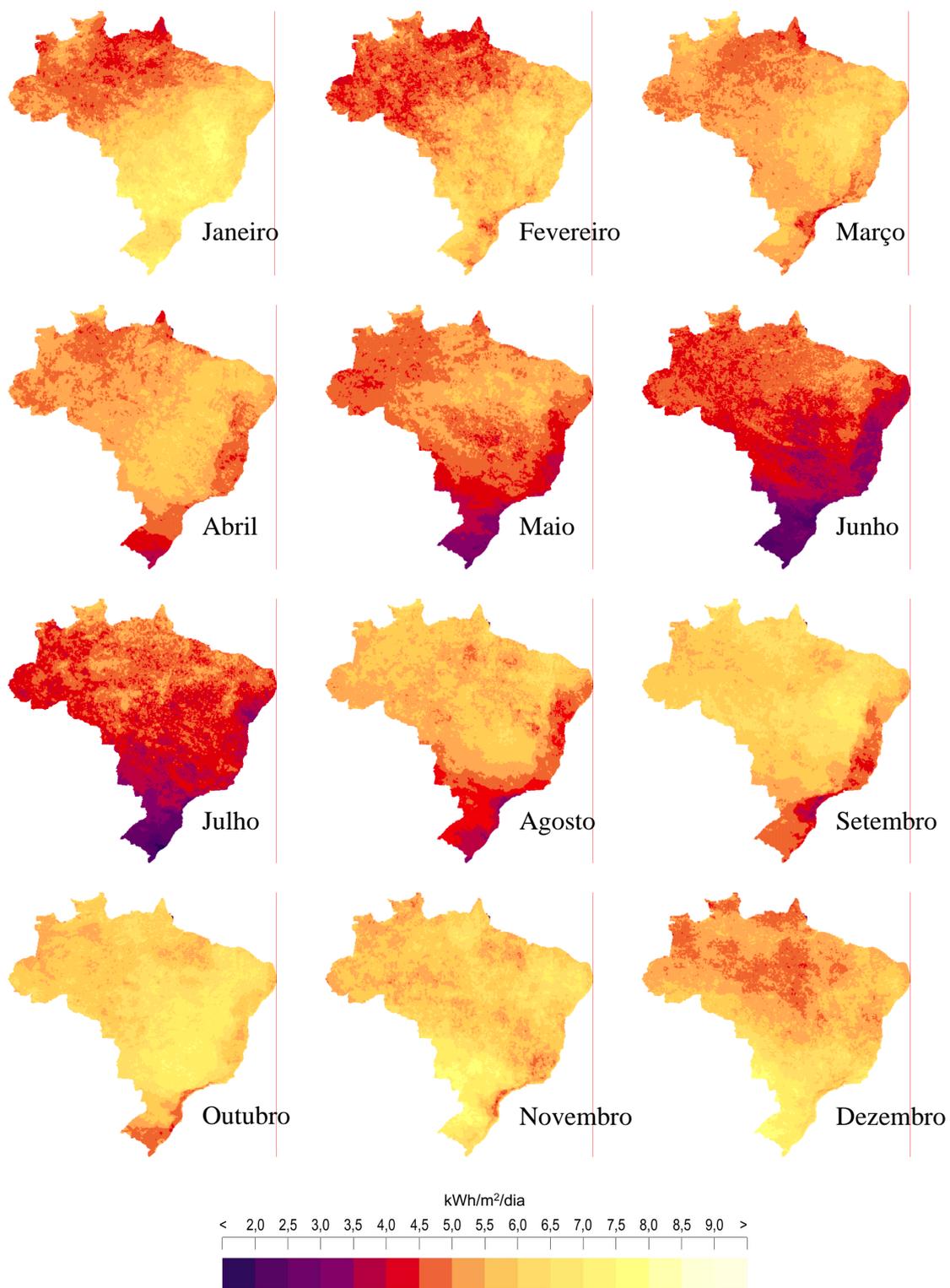
A Figura 3 apresenta os mapas da média mensal da irradiação solar global para os doze meses de 2000. Como era esperado, pode-se observar que o Brasil, devido a sua localização predominantemente tropical, possui uma grande disponibilidade de recursos de energia solar em todo o seu território. Os maiores valores de fluxo de radiação são observados na região central do país durante o verão quando valores da ordem de ??? são atingidos. É interessante notar que durante o verão, os valores de irradiação solar global observados na região sul do país são superiores aos valores obtidos para a região norte. Esse fato ocorre em consequencia do deslocamento da zona de convergência intertropical

que acarreta a maior frequência de nebulosidade e alta pluviosidade observada na região amazônica durante esta estação do ano.

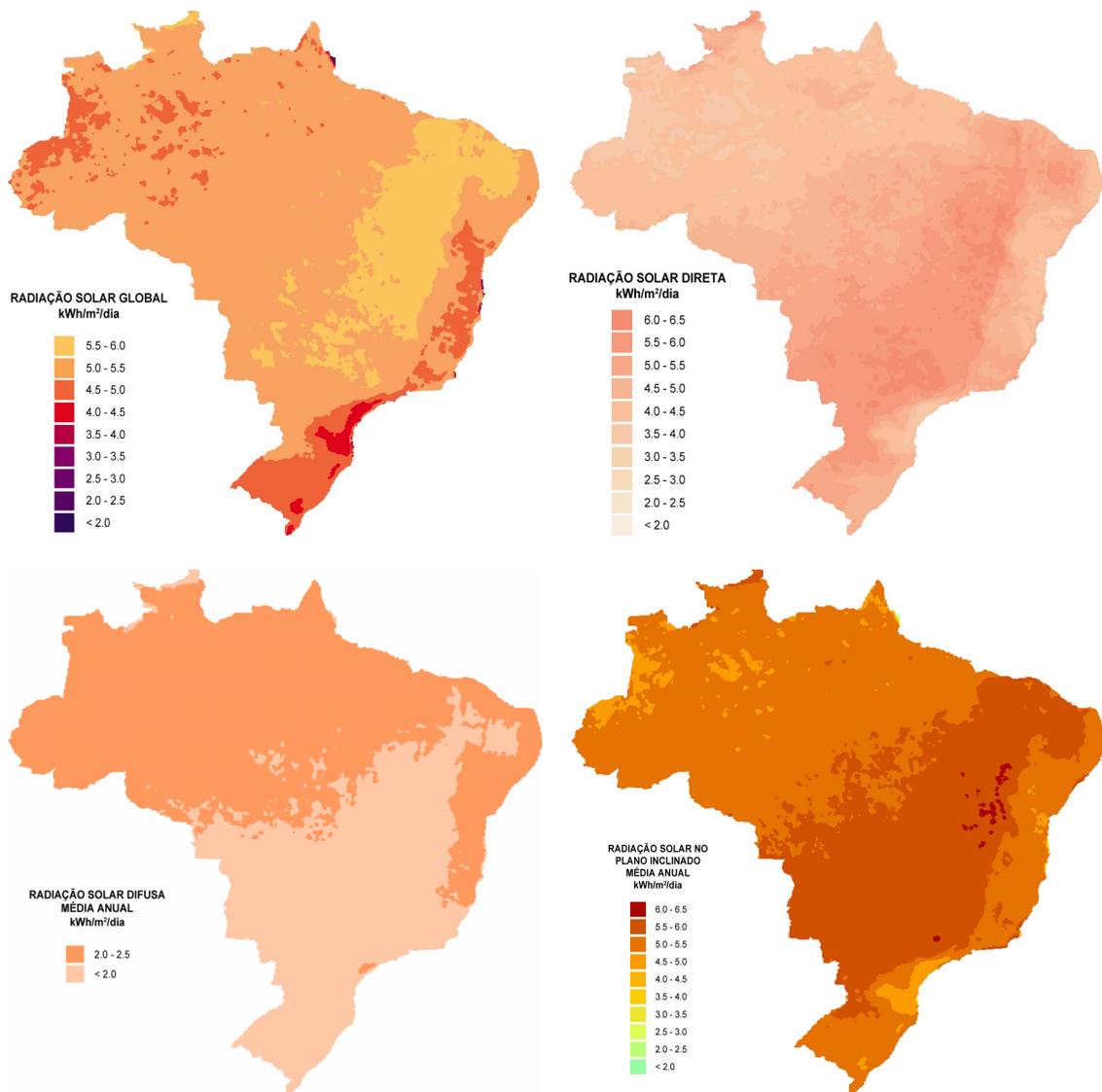
Mesmo durante o inverno, a irradiação solar na superfície é elevada apresentando os valores mínimos da ordem de  $2,5 \text{ kWhm}^{-2}/\text{dia}$  no sul do Brasil. Vale observar que durante a estação seca, as estimativas de irradiação solar apresentam incertezas maiores em função da ocorrência de queimadas na região central e norte do país que lançam grande quantidade de aerossóis na atmosfera capazes de absorver a radiação solar (Pereira *et al.*, 1999). Trabalhos realizados (Pereira *et al.*, 2000) indicam desvios que montam da ordem de 11% entre valores calculados e medidos sobre essas regiões, em comparação com os desvios bem menores, da ordem de 6% sobre as regiões onde não ocorrem queimadas. Estudos estão sendo desenvolvidos para incluir uma parametrização dos aerossóis emitidos em eventos de queima de biomassa em modelos de transferência radiativa, no entanto, a reduzida quantidade de informações disponíveis sobre a composição, a concentração e a distribuição espacial dos mesmos vem dificultando a obtenção de resultados consistentes.

Além dos mapas de irradiação solar global, mapas das componentes direta e difusa, de radiação fotosinteticamente ativa (PAR) e da irradiação em planos inclinados também estão sendo gerados e armazenados para disponibilização de acesso público. A Figura 4 mostra a média anual das componentes da irradiação solar (global, direta, difusa) e a irradiação solar no plano inclinado (em ângulo igual à latitude) para o território brasileiro. A informação contida no mapa de irradiação no plano inclinado (Figura 4D) é de grande utilidade no aproveitamento da energia solar em projetos de geração fotovoltaica ou térmica uma vez que mostra a quantidade de energia incidente no plano de maior irradiação solar direta considerando a posição geográfica do local. Pode-se observar que os maiores valores de irradiação direta e no plano inclinado ocorrem aproximadamente nas mesmas regiões do país: região compreendida pelo estado do Tocantins, oeste da Bahia e sul dos estados de Maranhão e Piauí durante o período de verão e na região central e sudeste do país durante a estação seca (agosto a outubro). A Figura 4(D) apresenta de forma clara o grande potencial para o aproveitamento da energia solar no Brasil. A média do território brasileiro ( $5 \text{ kW.h.m}^{-2}/\text{dia}$ ) é praticamente igual ao valor máximo de irradiação observado no continente europeu ( $5,5 \text{ kW.h.m}^{-2}/\text{dia}$ ) (Helioclim, 2004), onde ocorre um grande investimento tanto governamental como de iniciativa privada nesta fonte de energia renovável.

Estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de avaliar a variabilidade inter-anual do fluxo de radiação solar na superfície. Estimativas para o período de 1999 a 2004 estão sendo processadas e analisadas, o que permitirá também a realização de estudos para determinar quais os fatores climático-ambientais que influenciam na variabilidade dos recursos de energia solar. Esse é um aspecto importante para a avaliação dos riscos associados à investimentos para a aplicação desta fonte de energia.



**Figura 3.** Mapas de irradiação solar global média mensal para o território brasileiro obtidos com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000.



**Figura 4.** Mapas de irradiação solar média anual para o território brasileiro obtidos com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000: (A) irradiação global, (B) irradiação direta, (C) irradiação difusa e (D) irradiação global em plano inclinado em ângulo igual a latitude local.

#### 4. Conclusão

O trabalho descreve as atividades de mapeamento dos recursos de energia solar realizados no âmbito do projeto SWERA. O modelo BRASIL-SR foi validado e as estimativas por ele fornecidas foram comparadas com valores derivados de outros modelos utilizados pelo projeto SWERA em outras regiões do planeta. Os resultados desta etapa de intercomparação mostraram que o modelo apresenta um desempenho similar ou superior aos demais modelos com relação aos desvios das estimativas em relação às medidas de fluxo de radiação realizadas em superfície. Os mapas de irradiação solar para o ano de 2000 apresentam-se bastante consistentes com as condições climáticas observadas no período. O estudo da variabilidade interanual encontra-se em desenvolvimento e permitirá uma análise pormenorizada dos fatores climático-ambientais que influenciam na disponibilidade de energia solar na superfície. Todos os mapas de irradiação solar serão disponibilizados em produtos e ferramentas desenvolvidos em plataformas de sistema de informação geográfica (SIG) com a finalidade de disseminar informações confiáveis e, portanto, estimular a inclusão da energia solar na matriz energética do país. Uma ferramenta GIS encontra-se em fase final de desenvolvimento para permitir a associação dos mapas de irradiação solar com outras informações relevantes de infraestrutura (rodovias, hidrovias, linhas de distribuição de energia, plantas de geração de energia, etc), dados sócio-econômicos (industrialização, renda per capita, população, etc) a fim de tornar possível a avaliação de cenários de interesse e o desenvolvimento de metodologias para o planejamento e o desenvolvimento de programas de incentivos ao uso da energia solar.

#### Agradecimentos

O projeto SWERA está sendo desenvolvido com financiamento da UNEP/GEF (processo no. GFL-232827214364-SWERA). Agradecimento é devido ao CPTEC/INPE pelo apoio institucional no desenvolvimento do projeto e ao Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC) colaborador de longa data no desenvolvimento do modelo BRASIL-SR e operação das estações BSRN no Brasil. Agradecimentos são devidos aos seguintes companheiros sem os quais muito do trabalho ainda não teria sido completado: Mariza P. S. Echer, Sheila A. B. Silva, Hugo Corrá e Rafael Chagas.

#### Referências Bibliográficas

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 5th ISES European Solar Conference in Freiburg, Germany, September, 2004.

Helioclim – “Providing Information on Solar Radiation”. **European Solar Radiation Atlas**. Available from [www.helioclim.net/esra/index.html](http://www.helioclim.net/esra/index.html), 2004

Goldemberg, J., 1998. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, Brazil.

IPCC, 2001. **Climate Change 2001** (3 vols). United Nations Intergovernmental Panel in Climate Change. Cambridge University Press, UK. (available from [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

Martins, F. R., Pereira, E. B., Abreu, S. L., Beyer, H. G., Colle, S., Perez, R., Heinemann, D.. **Cross validation of satellite radiation transfer models during SWERA project in Brazil.** Proceedings of ISES Solar World Congress 2003-Solar Energy for Sustainable Future in Goteborg, Sweden, June 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 doutoramento, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 330pp (2001).

Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Couto, P., Stuhlmann, R., Colle, S.. **Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil.** Solar Energy, 68, 1, 91-107. January, 2000.