

# VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS REGIONAIS DOS RECURSOS DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL

*Fernando Ramos Martins<sup>1</sup>, Enio Bueno Pereira<sup>1</sup>, Sheila A. B. Silva<sup>1</sup>, Ricardo A. Guarnieri<sup>1</sup>*

**RESUMO:** Este trabalho discute a variabilidade anual e sazonal da irradiação solar incidente no território brasileiro, bem como a análise de tendência das médias anuais do total diário da irradiação solar, a partir das estimativas de irradiação solar global apresentadas no Atlas Brasileiro de Energia Solar. Observou-se que a região costeira dos estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo apresenta a maior variabilidade anual e em todas as estações ao longo do ano. As regiões amazônica e central do país apresentaram as menores variabilidades. Analisando a série temporal dos valores médios anuais de irradiação solar para cada uma das regiões geográficas brasileiras foi observada uma tendência de decréscimo ao longo do período de estudo, exceto na região Sul. Estudos mais detalhados serão realizados com o intuito de avaliar as razões desse decréscimo.

**ABSTRACT:** This paper presents a seasonal and annual variability study for daily totals of solar irradiation. Variability maps and regression analysis for 1995-2005 data series of annual averages of daily solar irradiation in Brazil are presented and discussed. The solar maps published in Brazilian Solar Energy Atlas are the starting point for the analysis presented here. It was noted that Amazon and central regions of Brazil has the lowest variability. By the other side, coastal areas of south and southeast presented the largest variability. A tendency analysis showed that annual averages of daily totals are becoming lesser throughout the 1995-2005 time period.

**Palavras-chave:** modelo de transferência radiativa, energia solar, variabilidade anual e sazonal.

## INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas associadas ao aquecimento global estão se acelerando e seus impactos já são visíveis sobre os ecossistemas naturais, geleiras, agricultura, recursos hídricos, zonas costeiras e saúde humana, em escala global. Além disso, surgem novas evidências de aumento dos desastres naturais associados à intensificação de fenômenos meteorológicos e climáticos extremos. Todas as evidências demonstram que a principal causa destas mudanças é a emissão dos gases de efeito estufa, sobretudo o dióxido de carbono oriundo da queima de combustíveis fósseis, mas também o metano, oriundo da exploração e processamento das fontes primárias fósseis. Por outro lado, a qualidade de vida está fortemente ligada ao consumo de energia e, como consequência desse fato, estima-se um crescimento da demanda de energia principalmente nos países em desenvolvimento. Esse aumento da demanda energética em conjunto com a crescente preocupação das consequências ambientais do consumo de combustíveis fósseis está impulsionando a pesquisa, o desenvolvimento e o uso de tecnologias para a geração de energia a partir do fluxo de radiação solar incidente na superfície. As recomendações do IPCC [1] para redução das emissões do setor energético apontam para um processo de substituição dos combustíveis fósseis por fontes

---

<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).

renováveis de energia, tais como a energia solar. No Brasil, os cenários de penetração de recursos renováveis são muito promissores [2]. O país apresenta um dos maiores potenciais de utilização das energias renováveis e apresenta uma matriz energética das mais limpas do planeta. Este fator lhe oferece uma vantagem comparativa em um mundo que terá que caminhar aceleradamente para maior uso de energias renováveis para mitigar as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas decorrentes. Além das barreiras tecnológicas e econômicas, a falta de informações é um importante obstáculo para a inserção de fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira. Essa barreira de informações inclui o conhecimento limitado da variabilidade dos recursos energéticos e dos níveis de confiança associados às diversas variáveis naturais como o clima e impactos antropogênicos no meio ambiente.

O clima apresenta uma influência significativa tanto sobre a demanda de energia elétrica como na geração e distribuição de energia. Diversos trabalhos publicados descrevem o comportamento e a variabilidade da demanda e consumo de energia em termos regionais e globais em consequência do aquecimento do planeta causado pelo aumento da concentração dos gases de efeito estufa [3,4]. Esses trabalhos indicam que a demanda de energia crescerá, principalmente, em razão do crescimento do uso de refrigeração ambiente em regiões tropicais como a que o Brasil está localizado. Além disso, o aumento da temperatura terá influência na transmissão de energia uma vez que o despacho de carga possível por uma linha de transmissão está relacionado com fatores climáticos como temperatura, radiação solar e velocidade de vento.

Outro aspecto importante a ser observado é a influência dos fatores climáticos sobre a disponibilidade de recursos dessas fontes energéticas. Diversos trabalhos foram publicados com o objetivo de avaliar a influência das mudanças climáticas sobre os recursos energéticos para algumas regiões do planeta [5]. No Brasil, diversos trabalhos para avaliação dos recursos energéticos [2,6,7,8] foram publicados ou ainda estão em desenvolvimento, no entanto pouco se produziu, até o momento para avaliar os possíveis impactos das variações do clima sobre esses recursos. A Divisão de Clima e Meio Ambiente do CPTEC/INPE está iniciando um projeto com essa finalidade, e este trabalho apresenta os seus resultados preliminares. Este artigo discute as variabilidades observadas no fluxo de radiação solar incidente a partir dos resultados apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar. O artigo descreve a metodologia empregada para determinação das variabilidades inter-anuais e a análise de tendências da irradiação solar no período de 1995 a 2005.

## **METODOLOGIA**

O ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho foram os mapas do total diário de irradiação solar no território brasileiro apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar. O Atlas é um produto do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) coordenado pelo

CPTEC/INPE sob o patrocínio do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) GEF (*Global Environment Facilities*). O projeto SWERA teve como objetivo principal a geração de uma base de dados que integrassem informações sócio-econômicas e levantamento de recursos renováveis com a finalidade de incrementar e estimular o desenvolvimento de projetos para a adoção de fontes alternativas de energia, com ênfase em energia solar e eólica. As estimativas de irradiação solar apresentadas no Atlas foram produzidas utilizando o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR alimentado por dados climatológicos de variáveis meteorológicas básicas e dados de cobertura efetiva de nuvens obtidos a partir de imagens do satélite GOES. Uma descrição mais detalhada do modelo BRASIL-SR está disponível em (Martins et al., 2006).

A variabilidade média anual,  $V_{anual}$ , aqui utilizada, foi definida como a média da variabilidade inter-anual observada para cada dia do ano, sendo determinada matematicamente utilizando a expressão em (1). A variabilidade inter-anual,  $V_{d,a}$ , para cada dia do ano foi determinada por meio da razão entre o desvio quadrático médio e o valor médio do total diário do fluxo solar para cada dia do ano no período de 1995 a 2005, descrito pela expressão (2).

$$V_{anual} = \frac{V_{d,a}}{N_d} = \frac{\sum_{d=1}^{365} \left[ \frac{DQM_d}{\bar{I}_d} \right]}{N_d} \quad (1) \quad \text{onde} \quad DQM_d = \sqrt{\frac{\sum_{a=1995}^{2005} (I_{d,a} - \bar{I}_d)^2}{N_a}} \quad (2)$$

é o desvio quadrático médio para o dia  $d$  do ano,  $N_d$  é o número de dias com dados válidos,  $N_a$  é o número de anos com dados válidos,  $I_{d,a}$  representa o total diário de irradiação solar global para o dia  $d$  no ano  $a$  e  $\bar{I}_d$  é o valor médio de  $I_{d,a}$  no período de julho de 1995 a dezembro de 2005. Dessa forma, podemos interpretar uma variabilidade anual igual a 0,45 ( $V_{anual}=0,45$ ) como a dispersão média anual apresentada pelos valores do total diário em torno de seu valor médio obtido para o período de 10½ anos considerados neste estudo.

A variabilidade média sazonal,  $V_{sazonal}$ , foi definida como a média da variabilidade intra-sazonal observada para cada ano do período de 1995 a 2005, sendo determinada matematicamente utilizando a expressão apresentada em (3). A variabilidade intra-sazonal para um ano específico,  $V_{saz,a}$ , foi determinada por meio da razão entre o desvio quadrático médio e o valor médio do total diário do fluxo solar na estação do ano em estudo, descrito pela expressão (4).

$$V_{sazonal} = \frac{\sum_{a=1995}^{2005} V_{saz,a}}{N_a} \quad (3) \quad \text{onde} \quad V_{saz,a} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{d=n1}^{n2} (I_{d,a} - \bar{I}_{saz})^2}{N_d}}}{\bar{I}_{saz}} \quad (4),$$

$N_d$  é o número de dias com dados válidos,  $N_a$  é o numero de anos com dados válidos,  $I_d$  representa o total diário de irradiação solar global para o dia  $d$  no ano  $a$  e  $I_{saz}$  é o valor médio da irradiação solar

global na estação do ano em estudo. Dessa forma, uma variabilidade sazonal igual a 0,45 ( $V_{sazonal}=0,45$ ) significa que para esse local do mapa o total diário da irradiação solar global apresenta uma dispersão média de 45% em torno da irradiação média sazonal.

## RESULTADOS

Os mapas apresentados na Figura 1 mostram a variabilidade média anual e médias sazonais obtidas com emprego da metodologia descrita acima. A informação contida no mapa de variabilidade anual mostra que toda a região amazônica e a parte setentrional das regiões Nordeste e Centro-Oeste, incluindo o nordeste do estado de São Paulo e oeste de Minas Gerais, apresentaram menor variabilidade média – menor de 25%. Essas regiões apresentam características climáticas que reduzem a variabilidade da irradiação solar incidente na superfície como, por exemplo, a baixa nebulosidade durante todo o ano na região semi-árida e a influência da ZCIT na região amazônica. Grande parte da região Sul e o leste da região Sudeste apresentou uma variabilidade 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 [9].

Verifica-se que as variabilidades sazonais apresentam o mesmo padrão verificado para a variabilidade anual. Toda a área centro-norte do país apresenta as menores variabilidades sazonais. Por outro lado, a área costeira das regiões Sul e Sudeste apresentam a maior variabilidade em todas as estações do ano. É importante notar que a área central do Brasil e a região amazônica apresentam menor variabilidade durante o Inverno (junho a agosto) 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.

Um estudo de regressão linear aplicado aos valores médios anuais determinados para cada uma das regiões geográficas do Brasil mostra uma tendência de redução do fluxo de radiação solar incidente em quatro das cinco regiões brasileiras. A Figura 2 apresenta as séries temporais da média anual de irradiação solar global juntamente com a linha de regressão linear e as curvas limites para o nível de confiança em 95% do ajuste linear. O resultado dessa tendência é mais significativo estatisticamente para as Regiões Norte e Sudeste, que apresentaram coeficientes de correlação  $r$  da ordem de -0.7. Apenas a região Sul não apresentou tendência definida.

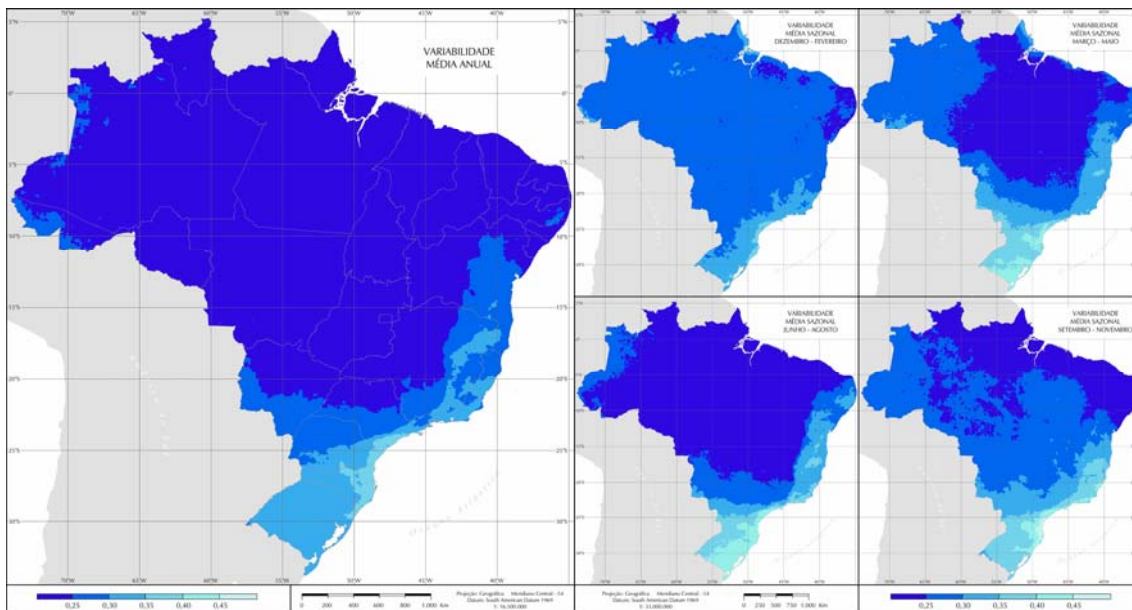


Figura 1. Mapa de variabilidade anual do fluxo de radiação solar global no território brasileiro.

## CONCLUSÕES

O trabalho apresenta os mapas de variabilidade anual e sazonais para o total diário da irradiação solar global no território brasileiro. A determinação da variabilidade foi realizada utilizando os dados de total diário estimados pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR para o período de 1995 a 2005 e que foram utilizados na produção do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Pode-se verificar que as características climáticas em cada região brasileira têm forte influência na variabilidade observada no período de 1995 a 2005. Assim as regiões amazônica e central do país apresentaram as menores variabilidades no período, enquanto que a região costeira dos estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo apresentou maior variabilidade anual e em todas as estações do ano.

Observou-se também, ao plotar a série temporal das médias anuais do total diário para o intervalo de 1995 a 2005, uma tendência de decréscimo ao longo do período em todas as regiões brasileiras, exceto a região sul. As regressões obtidas para as regiões Norte e Sudeste apresentaram significância estatística maior com fatores de correlação ( $r$ ) da ordem de 0,7.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PNUMA/GEF pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do projeto SWERA no Brasil e ao CNPq pelo suporte financeiro aos bolsistas de pós-doc e doutorado, e ao CPTEC/INPE pela suporte logístico e infraestrutura fornecidos para a realização do projeto.

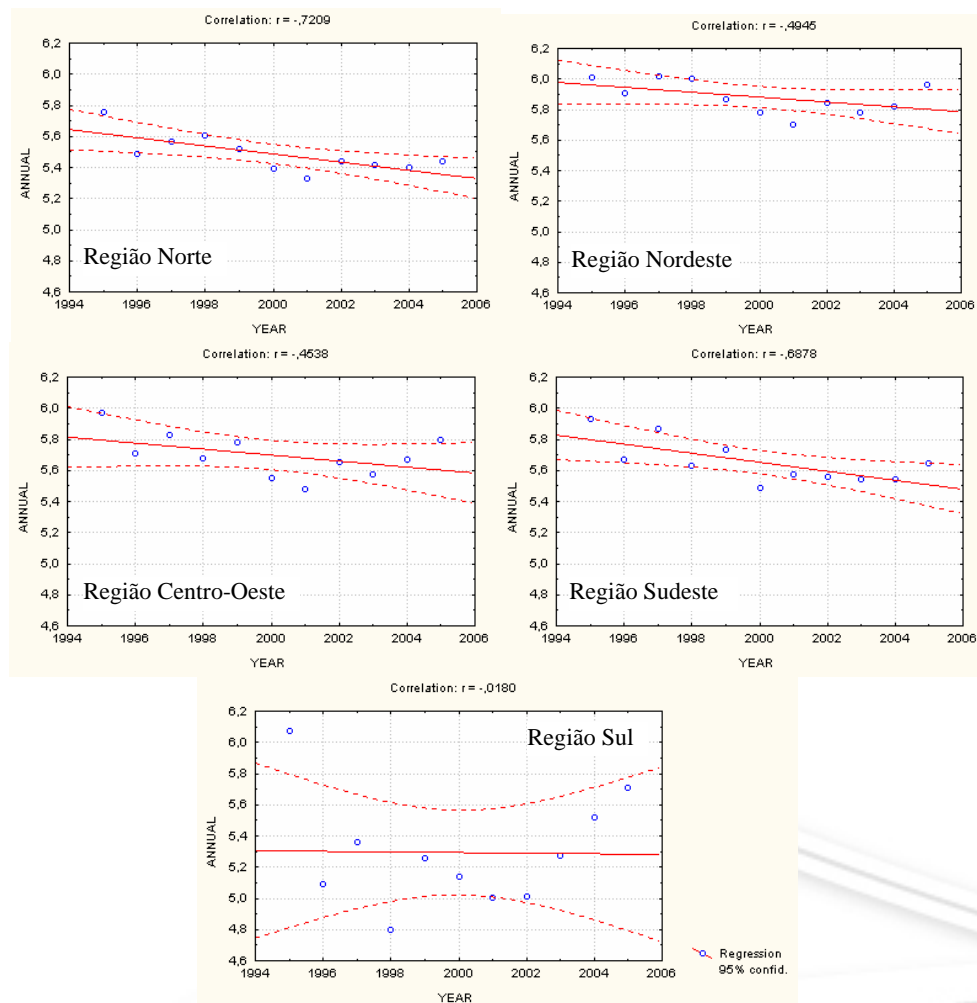


Figura 2. Análise de regressão linear aplicada às médias anuais de irradiação solar do período de 1995 a 2005 para os valores médios do total diário nas cinco regiões do Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IPCC, 2001. **IPCC Climate Change 2001** (3 vols). United Nations Intergovernmental Panel in Climate Change. Cambridge University Press, UK. [online]: <http://www.ipcc.ch>.
2. PNUMA, 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. (a ser publicado em novembro/2006). São José dos Campos, 2006.
3. Venäläinen, A. et al. The influence of climate change on energy production and heating energy demand in Finland. **Energy and Environment**, v.15, n.1, pp: 93-109, 2004.
4. Hitz, S.; Smith, J. Estimating global impacts from climate change. **Global Environmental Change**, 14, pp. 201-218, 2004.
5. Pan, Z. et al. On the potential change in solar radiation over the US due to increases of atmospheric greenhouse gases. **Renewable Energy**, v. 29, pp: 1923-1928, 2004.
6. Martins, F. R.; Pereira, E. B.; Abreu, S. L.; Colle, S. Satellite-derived solar resource maps for Brazil – SWERA project. **Solar Energy**, in press, 2006.
7. Silva, B. B. et al. Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no NE do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, pp:189-202, 2004.
8. Tiba, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.
9. INMET. **Normais Climatológicas para o Brasil**. [online] [www.inmet.gov.br/](http://www.inmet.gov.br/).