

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR

Enio Bueno Pereira
Fernando Ramos Martins
Samuel Luna de Abreu
Ricardo Rüther

Programa das Nações Unidas
para o Meio Ambiente



United Nations
Environment Programme

Fundo Global para o
Meio Ambiente



Global Environment Facility

Avaliação dos Recursos de
Energia Solar e Eólica



Solar and Wind Energy
Resources Assessment

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



National Institute for Space Research

Centro de Previsão de Tempo e
Estudos Climáticos



Center for Weather Forecasts and
Climate Studies

Laboratório de Energia Solar da
Universidade Federal de Santa Catarina



Solar Energy Laboratory of the
Federal University of Santa Catarina

Sistema de Organização Nacional
de Dados Ambientais



National Organization System
of Environment Data

Atlas Brasileiro de Energia Solar

Autores

Enio Bueno Pereira
Fernando Ramos Martins
Samuel Luna de Abreu
Ricardo Rüther

Realização

Divisão de Clima e Meio Ambiente - DMA
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT

Patrocínio

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA
Fundo Global para o Meio Ambiente (Global Environment Facility) - GEF
Projeto SWERA - Solar and Wind Energy Resources Assessment

São José dos Campos
1ª Edição - 2006

*Equipe envolvida no Projeto SWERA pelo
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais:*

Coordenação Geral:

Enio Bueno Pereira

Coordenação Científica e Desenvolvimento do Modelo:

Fernando Ramos Martins

Colaboradores:

Ricardo André Guarnieri

Sheila Araújo B. e Silva

Cristina S. Yamashita

Hugo Juarez Corrá

Rafael C. Chagas

Helton Pereira de Sousa

Tiago Gonçalves da Cunha

Projeto Gráfico e Arte Final:

Sílvia Vitorino Pereira

*Equipe envolvida no Projeto SWERA pela
Universidade Federal de Santa Catarina:*

Coordenação no LabSolar:

Sérgio Colle

Samuel Luna de Abreu

Cenários Energéticos:

Samuel Luna de Abreu (*)

Ricardo Rüter

Colaborador:

Raphael Ventura Dutra

* Atualmente no Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET-SC)

620.91

Atlas brasileiro de energia solar / Enio Bueno Pereira;
Fernando Ramos Martins; Samuel Luna de Abreu e
Ricardo Rüter. – São José dos Campos : INPE, 2006.
il.
60p. ; (PAPEL)

ISBN 85-17-00030-7

ISBN 978-85-17-00030-0

1.Energia. 2.Energia renovável. 3.Energia solar.
4.Radiação solar. 5.Modelagem atmosférica.
6.Sensoriamento remoto da atmosfera. I.Pereira, E.B;
II.Martins, F.R.; III. Abreu, S.L.; IV. Rüter, R. V.Título.

PREFÁCIO

Esta publicação foi desenvolvida dentro do escopo do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e co-financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF). O projeto, iniciado em 2001 sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE), tem como foco principal promover o levantamento de uma base de dados confiável e de alta qualidade visando auxiliar no planejamento e desenvolvimento de políticas públicas de incentivo a projetos nacionais de energia solar e eólica; e atrair o capital de investimentos da iniciativa privada para a área de energias renováveis. Os produtos do Projeto SWERA incluem uma série de informações que serão de grande utilidade dentro do contexto apresentado. Abrangem desde mapas e dados digitais das diversas componentes da radiação solar até dados detalhados de infra-estrutura e parâmetros sócio-econômicos dos países participantes deste projeto-piloto. A base de dados levantada é compatível com sistemas de informação geográfica (SIG) e, portanto, pode ser facilmente empregada em estudos de viabilidade econômica no desenvolvimento de projetos. Os produtos voltados para a energia solar aplicados ao Brasil foram desenvolvidos através de parceria entre a DMA/CPTEC/INPE e o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR /UFSC), fazendo uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR e de uma base geo-referenciada de dados ambientais e sócio-econômicos disponibilizados por diversos parceiros nacionais e internacionais e de distribuição gratuita. Os principais produtos na área de energia solar gerados como consequência do Projeto SWERA no Brasil são:

- mapas impressos e digitais de irradiação solar de alta resolução;
- geração de séries temporais horárias;
- construção de diferentes cenários de aproveitamento da energia solar desenvolvidos com o uso de ferramentas de um sistema de informações geográficas.

A base de dados e produtos gerados pelo Projeto SWERA estão disponíveis para acesso público em <http://swera.unep.net/>.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar está organizado em cinco partes distintas. A primeira delas descreve a metodologia empregada na obtenção dos dados de radiação solar e produção dos mapas; a segunda parte contém informações relativas aos níveis de confiança da

FOREWORDS

This publication was developed within the scope of the SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) project, financed by the United Nations Environment Program (UNEP) and co-financed by the Global Environment Facility (GEF). The project was started in 2001 under the coordination of the Climate and Environment Division of the Center for Weather Forecasts and Climate Studies of the Brazilian Institute for Space Research (DMA/CPTEC/INPE). The SWERA main focus is to promote the creation of a reliable and high-quality database intended to help in planning and developing public policies to offer incentives to national solar and wind energy projects and, attract capital investment from private sector in the renewable energy area. The products of SWERA Project include information that will be extremely useful within the aforementioned context. Such information includes maps and digital data of various solar radiation components as well as detailed infrastructure and socio-economic parameters of countries participating in this pilot project. The resulting database is compatible with the Geographical Information Systems (GIS) and therefore may be easily employed in feasibility studies during renewable energy project development. The solar energy products applicable to Brazil were developed by means of a partnership between DMA/CPTEC/INPE and the Solar Energy Laboratory of the Federal University of the State of Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC) by using the radiative transfer model BRASIL-SR and a geo-referenced database of environmental and socio-economic data made available by several national and international partners. The main products in the solar energy area, generated as a consequence of the SWERA Project in Brazil, are:

- high resolution solar radiation digital and printed maps;
- generation of hourly temporal series;
- development of utilization of solar energy scenarios by using GIS tools.

The products and database generated by the SWERA project are available for public access and free of charge at <http://swera.unep.net/>.

The Brazilian Solar Energy Atlas is divided into five distinct sections. The first section describes the methodology used to obtain the solar radiation data and to produce the solar maps. The second section contains information on the confidence levels of the methodology employed, obtained by comparing solar estimates provided by BRASIL-SR model with estimates provided by other models and ground data. The third section presents the maps of various solar radiation components (global, direct, diffuse, tilted plane, and PAR). The fourth

metodologia empregada, obtidos através de estudos de validação das estimativas do modelo BRASIL-SR com resultados de outros modelos e com dados de campo; a terceira parte apresenta os mapas das diversas componentes da radiação solar (global, direta, difusa, plano inclinado e PAR); a quarta parte analisa as variabilidades temporais e espaciais e as tendências dos recursos de energia solar e, finalmente, uma quinta parte apresenta alguns cenários de utilização desses recursos no Brasil.

Este trabalho contou com contribuição das instituições listadas abaixo:

- ASRC - Centro de Pesquisa em Ciências Atmosféricas / Universidade Estadual de Nova York, campus Albany - EUA
- DLR - Centro Aeroespacial Alemão
- NREL - Laboratório Nacional de Energias Renováveis - EUA
- TERI - Instituto de Recursos Energéticos - Índia

Agradecemos ao decisivo e contínuo apoio dado pelo INPE através do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos e suas Divisões de Satélites Ambientais (DSA) e Clima e Meio Ambiente (DMA), do Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM), do Centro Regional de Natal (CRN), da Unidade Regional Sul (RSU) em Santa Maria pela disponibilização de instalações e recursos humanos imprescindíveis à realização desse trabalho. Agradecemos também à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) em Caicó e a todos os colegas e colaboradores que, anonimamente, prestaram valiosa contribuição ao sucesso desse empreendimento.

Agradecemos ainda ao Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), através de sua Divisão de Tecnologia, Indústria e Economia, e ao Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), que prestaram apoio contínuo e irrestrito, além do necessário suporte financeiro.

Finalmente, agradecemos a Tom Hamlin, do PNUMA/DTIE, pelo dedicado acompanhamento em todas as etapas do projeto SWERA e Richard Perez, Hans Georg Beyer, Mariglaudio Gondim, Juan Ceballos, Luiz Augusto Toledo Machado, José Celso Thomaz Jr., Sylvio Luiz Mantelli Jr., Paulo Couto e João Gualberto por contribuições diversas para a elaboração deste Atlas.

section analyzes the temporal and spatial variations and trends of solar energy resources and, finally, the fifth section presents some solar energy scenarios for Brazil.

This work was supported by the institutions listed hereafter:

- ASRC - Atmospheric Sciences Research Center / State University of New York at Albany - USA
- DLR - German AeroSpace Center
- NREL - National Renewable Energy Laboratory - USA
- TERI - The Energy and Resources Institute - India

We hereby thank the decisive and continued support provided by INPE by means of its Climate and Environment Division of the Center for Weather Forecasts and Climate Studies and its Environmental Satellite Division, Environment and Climate Division, the Laboratory for Meteorological Instrumentation (LIM), the INPE's Regional Centers in Natal (CRN), in Santa Maria (RSU) which have provided the invaluable facilities and human resources in accomplishing this work. We also thank to Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN) in Caicó as well as all the colleagues and collaborators who, anonymously, dedicated their valuable contribution to the success of this endeavor.

We also thank to the United Nations Environment Program (UNEP), through its Technology, Industry and Economy Division (DTIE), and to the Global Environment Facility (GEF), which offered continuous and unlimited support, besides the necessary financial support.

Finally, we would like to thank Tom Hamlin, of UNEP/DTIE, for his full-hearted dedication during all phases of the SWERA project and Richard Perez, Hans Georg Beyer, Mariglaudio Gondim, Juan Ceballos, Luiz Augusto Toledo Machado, José Celso Thomaz Jr., Sylvio Luiz Mantelli Jr., Paulo Couto, and João Gualberto for several contribution to the achievement of this Atlas.

ÍNDICE

Introdução	9
Modelo de transferência radiativa	13
Modelos físicos para obtenção de estimativas de irradiação	14
Modelo BRASIL-SR	15
Base de dados	19
Dados de satélite	19
Dados climatológicos	20
Temperatura e visibilidade	20
Albedo de superfície	21
Umidade relativa	22
Altitude	22
Dados de irradiação solar	22
Rede SONDA	23
Rede de plataformas de coleta de dados (PCD)	24
Níveis de confiabilidade das estimativas de irradiação solar	25
Intercomparação de modelos	25
Comparação com dados coletados em superfície	26
Validação da irradiação global	26
Validação da DNI	28
Mapas solarimétricos	31
Mapas de radiação solar global horizontal	
Média anual	34
Média sazonal	35
Mapas de radiação solar PAR	
Média anual	36
Média sazonal	37

INDEX

Introduction	9
Radiative transfer model	13
Physical models to obtain solar radiation estimates	14
The BRASIL-SR model	15
Database	19
Satellite data	19
Climate data	20
Temperature and visibility	20
Surface albedo	21
Relative humidity	22
Altitude	22
Solar irradiation data	22
SONDA network	23
Network of automatic weather stations (AWS)	24
Reliability levels of solar irradiation estimates	25
Model inter-comparison	25
Comparison with ground data	26
Validation of global radiation	26
Validation of DNI	28
Solarimetric maps	31
Global horizontal solar radiation maps	
Annual mean	34
Seasonal mean	35
PAR solar radiation maps	
Annual mean	36
Seasonal mean	37

Mapas de radiação solar no plano inclinado	
Média anual _____	38
Média sazonal _____	39
Mapas de radiação solar difusa	
Média anual _____	40
Média sazonal _____	41
Estudo de variabilidade e tendências _____	43
Variabilidade anual _____	43
Variabilidade sazonal _____	44
Mapas de variabilidade da radiação global	
Média anual _____	46
Média sazonal _____	47
Tendências regionais _____	48
Cenários de aplicações da energia solar _____	51
Aquecimento solar _____	51
Fotovoltaico _____	53
Sistemas híbridos DIESEL-PV em pequenas redes na região amazônica _____	53
Sistemas PV interligados à rede em áreas urbanas _____	55
Referências bibliográficas _____	57
Índice de figuras _____	59
Índice de tabelas _____	60

Tilted plane solar radiation maps	
Annual mean _____	38
Seasonal mean _____	39
Diffuse solar radiation maps	
Annual mean _____	40
Seasonal mean _____	41
Variability and trends study _____	43
Annual variability _____	43
Seasonal variability _____	44
Global radiation variability maps	
Annual mean _____	46
Seasonal mean _____	47
Regional trends _____	48
Solar energy application scenarios _____	51
Solar heating of water _____	51
Photovoltaic _____	53
Hybrid DIESEL-PV systems in mini-grids in the amazon region _____	53
Grid-connected PV systems in urban areas _____	54
References _____	57
Figures index _____	59
Tables index _____	60

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda e consumo de energia decorrente do progresso tecnológico e do avanço no desenvolvimento humano (caracterizado por parâmetros sócio-econômicos) são apontados como os fatores mais importantes 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 recuperação econômica nos países em desenvolvimento. A tendência de crescimento atual aponta que, provavelmente, na segunda década deste século, o consumo de energia nos países desenvolvidos seja ultrapassado pelo consumo nos países em desenvolvimento em virtude da melhoria dos parâmetros sócio-econômicos nesses países [1].

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 comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental.

A Figura 1a apresenta a estrutura da matriz de oferta de energia primária brasileira e a Figura 1b a empregada na produção de eletricidade. A queima de combustíveis fósseis responde por grande parte da demanda de energia no setor de transporte e atende a cerca de 40% da energia utilizada no setor agropecuário brasileiro causando a contribuição mais importante em emissão de gases do efeito estufa (CO₂, CO, etc.) no Brasil. Programas de incentivo para adoção de queima de biomassa (etanol e biodiesel) estão em implementação no país [2] e espera-se que num futuro próximo, a biomassa tenha uma contribuição significativa nesses setores reduzindo a contribuição brasileira para a emissão global de gases de efeito estufa.

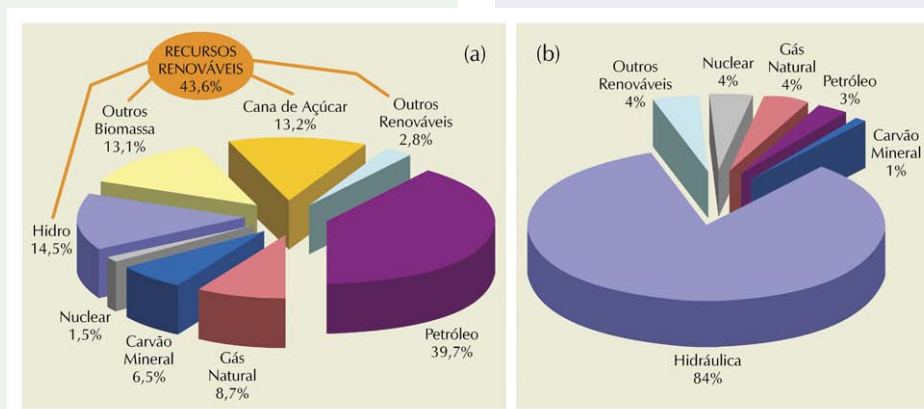


Figura 1. (a) Matriz energética brasileira e (b) Matriz de energia elétrica [2].

INTRODUCTION

The increase in demand and consumption of energy resulting from the technological progress and the improvement of human development (characterized by social-economic parameters) are being blamed as the most important factors in accelerating climatic and environmental changes observed and described by the scientific community. The energy consumption raised more than three fold after the Industrial Revolution and recent studies show a growth trend in energy demand as a consequence of the economical recovery in developing countries. The present growth rate shows that the energy consumption in developed countries will be surpassed by the consumption in the developing countries in the second decade of this century, due to the improvement of the socioeconomic parameters within these countries [1].

The increase in energy demand in conjunction with the possibility of a reduction in the supply of conventional fuels and the increasing concern with preserving the environment are driving the scientific community to research and develop alternate energy sources that are less polluting, renewable and have a lesser impact on the environment.

Figure 1a shows the matrix structure of the primary Brazilian energy supply and Figure 1b the energy matrix used in the production of electricity. The fossil fuels is responsible for great part of the energy demanded by the transportation sector and provides about 40% of the energy used by the Brazilian farming sector. Incentive programs to adopt the biomass fuels (ethanol and biodiesel) are being implemented in the country [2] and it is expected that in a not too distant future, biomass will make a significant contribution towards these sectors thereby reducing the Brazilian contribution for the global emission of gases that cause the greenhouse effect.

Atualmente, a energia hidráulica é a principal fonte de energia para geração de eletricidade no Brasil. Apesar de ser considerada uma fonte renovável e limpa, as usinas hidroelétricas produzem um impacto ambiental ainda não adequadamente avaliado, devido ao alagamento de grandes áreas cultiváveis ^[3]. Estudos mostram que gases do efeito estufa, principalmente o Metano (CH₄), são emitidos para atmosfera em consequência de processos de degradação anaeróbica da matéria orgânica que ocorrem em áreas alagadas ^[4]. Além disso, as principais bacias hidrográficas brasileiras com capacidade de geração hidroelétrica de alta densidade energética já estão praticamente esgotadas nos principais centros consumidores do País.

Energia nuclear é citada como uma fonte “limpa” de energia elétrica por não provocar a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. Sob o ponto de vista do desenvolvimento, é uma alternativa para cobrir o déficit de energia previsto, diversificar as fontes de energia nacionais e viabilizar o programa nuclear brasileiro. O país conta com a sexta maior reserva de urânio do mundo e apenas 25% do território nacional foram mapeados. Por conta disso, o governo retomou o projeto de construção da usina nuclear de Angra III, com capacidade de 1.300 MW, completando assim o ciclo que iniciou com Angra 1 em 1985. Contudo, a energia nuclear não tem sido bem aceita pela sociedade civil em razão do questionamento sobre os riscos associados e ao problema do armazenamento dos rejeitos radioativos gerados.

Dentre as fontes renováveis de energia elétrica, a energia eólica é a que vem recebendo maior volume de investimentos por conta do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA – <http://www.mme.gov.br/>), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia. A capacitação tecnológica da indústria nacional e o custo decrescente da eletricidade de origem eólica, quando associados ao enorme potencial eólico nacional (143,5 GW segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro ^[5]), indicam que essa forma de geração poderá ocupar, em médio prazo, um importante papel no país, principalmente atuando como fonte descentralizada e complementar de energia acoplada a rede elétrica. No entanto, segundo essa mesma fonte de informação, boa parte do território brasileiro, incluindo praticamente toda a região amazônica e central do Brasil, não apresenta condição de vento adequada para geração de eletricidade.

Por outro lado, o Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano ^[6, 7]. A utilização da energia solar traz benefícios a longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento, regulando a oferta de energia em períodos de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera como estabelece a Conferência de Kyoto ^[8]. Existe um grande leque de possibilidades a médio e longo prazo para aproveitamento dessa abundante forma de energia renovável, que vai desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até as grandes centrais que empregam energia solar

Presently, hydroelectric power is the main source of power generation in Brazil. In spite of being considered a renewable and clean source of energy, the hydroelectric power plants cause an impact on the environment not yet fully assessed, due to the flooding of vast agricultural or pristine forested areas ^[3]. Studies show that greenhouse gases, mainly methane (CH₄), are released into the atmosphere as a consequence of the anaerobic decomposition of organic matter that takes place in flooded areas ^[4]. In addition, the main hydrographic basins suitable for high-density hydroelectric power generation have practically all been used up primarily the ones near to the main Brazilian consumption centers.

The nuclear energy is often mentioned as a "clean" power source because it does not release greenhouse gases into the atmosphere. From the development point of view, it is an alternative to diversify the national energy supply, to make the Brazilian nuclear energy program viable, and to reduce the expected energy deficit. Brazil already figures as having the sixth largest uranium reserve in the world, despite that only 25% of the national territory has been surveyed thus far. Because of that the government resumed the project of building the Angra III nuclear power plant with a capacity of 1,300 MW, thereby completing the cycle started with Angra I in 1985. However, nuclear energy has not been well accepted by the public (or citizens) due to the risks issues linked to the power plant operation and the radioactive waste management and storage.

Among various renewable forms of electric power, wind energy is the one receiving the largest portion of investments from the Incentive Program for Alternate Electric Power Sources (PROINFA – <http://www.mme.gov.br/>), coordinated by the Mines and Energy Ministry. The technological qualification of the national industry and the decreasing cost of wind generated electric power, when associated with the huge national wind potential (143.5 GW according to the Atlas of Brazilian Wind Power Potential ^[5]), indicate that this form of power generation may play, at least in the medium term, a very important role in Brazil, mainly acting as a decentralized and complementary power source coupled to the electric network. However, according to this very same source of information, a good portion of the Brazilian territory, including almost the entire Amazon region and the central part of Brazil, do not hold the adequate wind conditions for electric power generation.

But since Brazil is mostly located in the inter-tropical region, it has a great potential to capture solar energy during the entire year ^[6, 7]. Solar power utilization brings long term benefits to the nation making possible the development of remote regions where the cost of electric power by the conventional methods would be too high for an attractive financial return on the investment. In addition, solar energy would contribute to regulate the energy during drought periods and thereby diminishing the dependency on the crude oil market with a consequent decrease in polluting gas emissions into the atmosphere as established by the Kyoto Conference ^[8]. There is a great variety of possibilities on the medium and long term for the

concentrada, ou a sistemas de produção de hidrogênio para utilização em células de combustível para a produção de trabalho com emissão zero de CO₂. No entanto, hoje em dia essa energia ainda tem uma participação incipiente na matriz energética brasileira - apenas a energia solar térmica para aquecimento de água tem despertado interesse no mercado nacional, principalmente para o emprego entre as classes A e B da sociedade, na indústria e nos serviços de hotelaria.

Além da importância atual no panorama energético e no desenvolvimento sustentável do país, o conhecimento da radiação solar incidente é importante para áreas da atividade humana como, por exemplo, a meteorologia e a climatologia. No setor de agronegócios, é importante para o planejamento e obtenção da maior eficiência energética nas diversas etapas de produção: a seleção das culturas, o plantio, a colheita incluindo o desenvolvimento e operação de sistemas de irrigação de áreas e a secagem de grãos.

Na arquitetura e na construção civil, as práticas de eficiência energética e de conforto térmico necessitam de informações confiáveis sobre a iluminância natural e o fluxo de energia solar. Isso se aplica também a diversas outras áreas da atividade humana como, por exemplo, em sistemas de conservação de alimentos, vacinas e remédios, em refrigeração e aquecimento em geral, etc.

As perspectivas e oportunidades de aproveitamento do potencial econômico relacionado com a exploração comercial dos recursos energéticos da radiação solar dependem basicamente de dois fatores: 1) do desenvolvimento de tecnologia competitiva de conversão e armazenamento dessa energia; e 2) de informações seguras e da política energética do país. Grande parte dos potenciais investidores e produtores do setor energético não dispõem de informações nem de conhecimento, com o embasamento científico necessário, sobre as opções em fontes renováveis de energia e, por conta disso, tendem a evitar os riscos econômicos e financeiros associados ao desenvolvimento de projetos nessa área. De um modo geral, as informações de caráter científico necessárias são:

- o levantamento em alta resolução espacial do potencial energético solar;
- séries temporais de longa duração de dados de campo com resoluções temporais e espaciais adequadas à realização de estudos de incertezas e tendências;
- conhecimento sobre a variabilidade dessas fontes renováveis associada à fatores naturais e antropogênicos.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar tem como objetivo suprir parte dessa demanda de informações por meio da divulgação do levantamento da disponibilidade de energia solar no território brasileiro utilizando um modelo de transferência radiativa alimentado por dados climatológicos e de 10 anos de informações extraídas de imagens de satélite geoestacionário e validado por dados coletados em estações de superfície. O mapeamento do potencial energético solar apresentado neste documento é um dos produtos gerados pelo Projeto SWERA.

use of this abundant renewable energy source ranging from small photovoltaic self-contained systems up to large plants using concentrated solar power, or hydrogen generating systems to be used in fuel cells that operate with zero emission of CO₂. However, today this form of energy plays an insignificant part in the Brazilian energy matrix - only solar thermal energy for water heating attracted the national market interest so far, mainly for use by classes A and B of society, industry and the lodging industry.

In addition to its importance in the current energetic scenario and the sustained development, the knowledge of the solar energy flux at the surface is of chief importance for human activity areas such as meteorology and climatology. In the agricultural business sector it is important for planning and obtaining the maximum energetic efficiency for the various phases of production: the selection of crops, planting, harvesting, including the development of area irrigation systems and grain drying.

In architecture and civil engineering, efficient energy management and thermal comfort require reliable information about natural lighting and solar energy flux. This also applies to several other areas of human activity such as, for example, food, vaccines and drug preserving systems, general cooling and heating, etc.

The outlook and opportunities for harnessing the economic potential related to the commercial exploitation of energy resources of solar radiation basically depend on two factors: 1) the development of a competitive conversion and storing technology for this energy; and 2) the availability of reliable information linked to the energy policy of the nation. A great portion of the potential investors and stakeholders in the energy sector do not have information or knowledge available, on a solid scientific basis, about their options with regards to renewable sources of energy and for that reason they tend to avoid economic and financial risks associated with projects in this area. In general, the required scientific information consists of:

- a high resolution space survey of the solar energy potential;
- long time series of ground data with temporal and spatial resolutions adequate for the analysis of uncertainties and trends;
- knowledge about the variability of these renewable sources as they relate to natural and man-made factors.

The Brazilian Atlas for Solar Energy is designed to supply for a portion of this demand for information through the dissemination of a survey of the available solar energy in the Brazilian territory using a radiation transfer model fed by climate data and 10 years of information extracted from geostationary satellite images and validated by data collected from ground stations. The mapping of the solar energy potential presented here is one of the products generated by the SWERA Project.

Este Atlas apresentará, inicialmente, a metodologia empregada para a obtenção das estimativas de irradiação solar: o modelo de transferência radiativa, a base de dados de alimentação do modelo e o processo de validação das estimativas por ele fornecidas. Em seguida, os resultados das médias anuais e médias sazonais das diversas componentes da irradiação solar bem como a variabilidade associada a cada um deles serão apresentados e discutidos. Ao final serão apresentados gráficos de tendências da disponibilidade de potência para cada região do Brasil e uma breve discussão de cenários de uso de energia solar para o Brasil.

This Atlas will present the methodology employed to obtain the solar radiation maps: the radiative transfer model, its input database, and the validation process of the estimates provided by this method. Afterwards, the results of the annual and seasonal averages of the various solar irradiation components as well as the variability associated to each one of them will be presented and discussed. At the end graphs showing the power availability trends for every region of Brazil will be presented with a brief discussion of various scenarios for the use of solar energy in Brazil.

MODELO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

Basicamente, existem dois métodos para o levantamento dos recursos de energia solar em uma região extensa: a utilização de uma rede de radiômetros distribuídos pela região 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, como o empregado nesse trabalho, o mesmo não pode ser generalizado para os resultados de interpolações entre os radiômetros. Perez et al. ^[9] demonstrou que, quando as distâncias entre os radiômetros de uma rede de observação forem superiores a 45 km, os dados interpolados de totais diários de irradiação apresentam níveis de confiabilidade inferiores às estimativas obtidas com modelos que utilizam imagens de satélite. Resultado similar foi obtido em um estudo empregando-se dados obtidos em 16 plataformas de coleta de dados operadas pelo CPTec/INPE na região Sudeste do Brasil ^[10] (Figura 2).

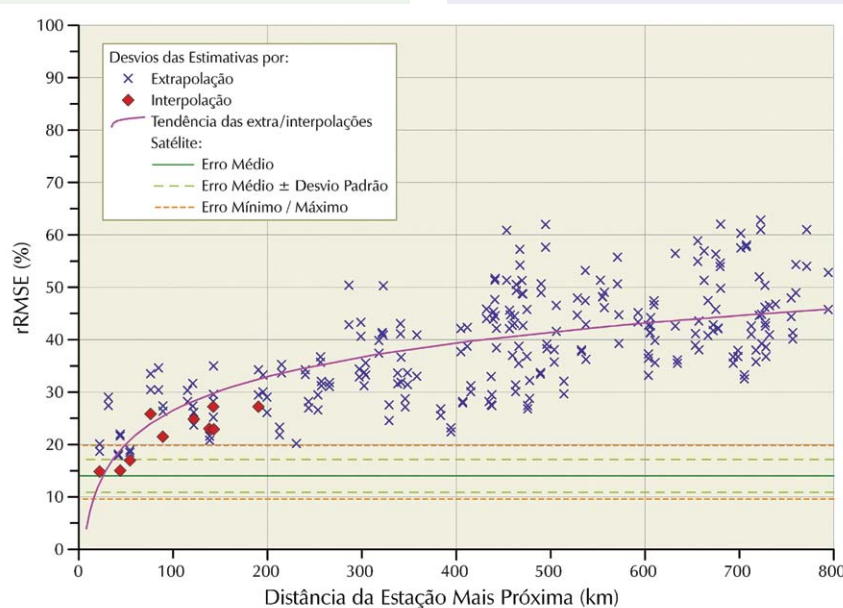


Figura 2. Comparação dos desvios rRMSE das estimativas de radiação global obtidas por extra/interpolação de dados coletados em 16 PCDs da região sudeste e estimativas do modelo BRASIL-SR baseadas em imagens de satélite. A linha magenta representa a curva de tendência dos desvios das estimativas por extra/interpolação em função da distância à PCD mais próxima. As linhas horizontais representam o intervalo dos desvios de estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

RADIATIVE TRANSFER MODEL

Basically there are two methods to survey the solar energy resources in a given area of interest: the utilization of a radiometer network distributed over the region along with data interpolation techniques, and the use of computer models to estimate the incidence of solar radiation through empirical relations or by solving the physical equations that describe the radiative transfer in the atmosphere.

In spite of the fact that the radiation data obtained through radiometers, usually, present confidence levels over and above those obtained through radiation models, such as the one used in this work, it cannot be generalized for the interpolation results between radiometers. Perez et al. ^[9] demonstrated that when the distances between radiometers in a ground net-work are greater than 45 km, the interpolated data of the daily total radiation exhibit confidence levels below the estimates obtained with computer models that use satellite images. A similar result was obtained in a study using data acquired by 16 automatic weather stations operated by CPTec/INPE in the South-eastern region of Brazil ^[10] (Figure 2).

Figure 2. Comparison between rRMSE deviations observed for global solar radiation estimates obtained by extra/interpolation of ground data acquired at 16 AWS in operation at Southeast region of Brazil and obtained by using BRASIL-SR model and satellite images. The magent line is the tendency curve of extra/interpolation deviations as a function of distance from the nearest AWS. The horizontal lines represent the range of deviation values obtained by using BRASIL-SR.

MODELOS FÍSICOS PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Quando atravessa a atmosfera, a radiação solar é atenuada por processos físicos de espalhamento e absorção com os constituintes atmosféricos e a superfície do planeta. Na Figura 3 estão representados, de forma bastante simplificada, os principais processos de interação da radiação solar e da radiação térmica no sistema Atmosfera-Terra.

As nuvens, os gases, partículas atmosféricas e a superfície refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível). A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é reemitida na faixa do infravermelho do espectro de radiação eletromagnética – 4 a 100 μm – sendo que 6% é proveniente da superfície e 64% tem origem em nuvens e constituintes atmosféricos.

Para estimar o fluxo de radiação solar na superfície, os modelos utilizam parametrizações que simulam esses processos físicos na atmosfera. As parametrizações baseiam-se em dados coletados em superfície ou por satélites que permitem inferir as propriedades óticas da atmosfera e, portanto, a contribuição de cada processo radiativo na transmitância atmosférica total da radiação solar.

Tais modelos podem ser classificados em estatísticos e físicos. Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas entre medidas de radiação incidente na superfície e condições atmosféricas locais e, geralmente, apresentam validade restrita à região estudada. Já os modelos físicos são válidos para qualquer região uma vez que solucionam a equação de transferência radiativa que descreve matematicamente os processos físicos que ocorrem na atmosfera. A principal dificuldade da aplicação de modelos físicos reside na obtenção dos dados necessários para a parametrização das interações entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos. Entre esses dados pode-se citar a cobertura de nuvens e o perfil dos constituintes

PHYSICAL MODELS TO OBTAIN SOLAR RADIATION ESTIMATES

When passing through the atmosphere the solar radiation has its intensity reduced through scattering and absorption processes by the atmospheric components. Figure 3 represents, in a very simplified way, the main interacting processes of solar radiation and thermal radiation of the Earth-Atmosphere system.

The clouds, the gases, atmospheric particles, and the surface reflect about 30% of the radiation incidence at the top of the atmosphere. The other 70% are absorbed in heating up the system and causing water evaporation (latent heat) or convection (sensible heat). The energy absorbed by the Earth-Atmosphere system is re-emitted back to space in the infrared spectrum band of electromagnetic radiation - 4 to 100 μm - where 6% comes from the surface and 64% from clouds and other atmospheric components.

To estimate the solar radiation flux at the surface, the models use parameterizations that simulate these physical processes in the atmosphere. The parameterizations are based on data collected on a surface or through satellites that allow inferring the optical properties of the atmosphere and thereby the contribution of each radiation process in the total atmospheric transmission of solar radiation.

Such models may be classified as stochastic and physical. The stochastic models use empirical formulations between radiation incidence measurements at the surface and local atmospheric conditions and generally are valid only for the region being studied. The physical models on the other hand are valid for any region as they solve the radiative transfer equation that mathematically describes the physical processes in the atmosphere. The main difficulty in applying the physical models resides in obtaining the necessary data to parameterize the interactions between solar radiation and the atmospheric components. Among these data, cloud coverage and the profile of atmospheric components such as aerosols, water vapor, ozone and other gases can be mentioned.

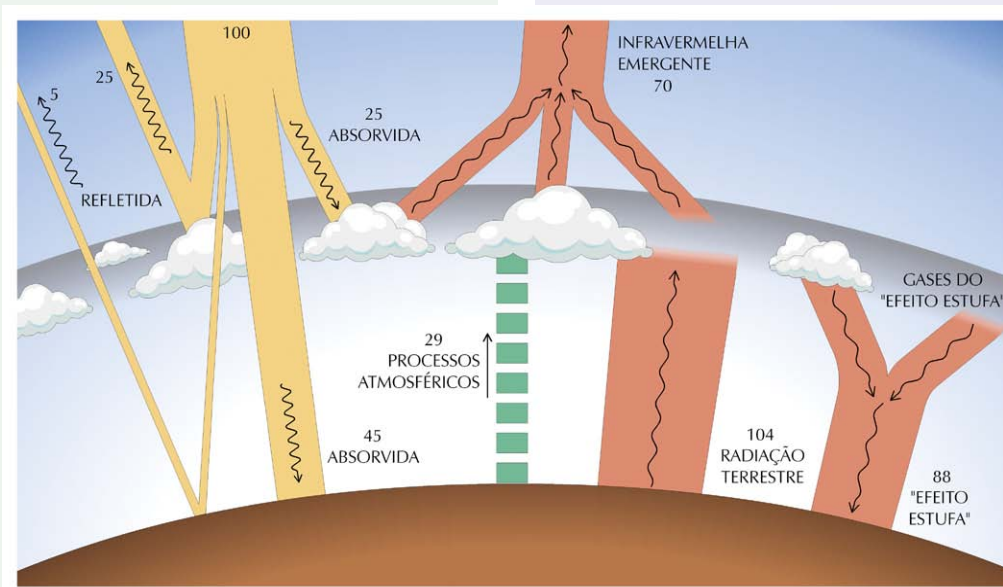


Figura 3. Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Os valores numéricos representam a fração de energia em cada processo radiativo na atmosfera. Modificado a partir de Gambi [11].

Figure 3. Diagram of radiative processes of solar radiation in the Earth's atmosphere. The numeric values represent the energy fraction in each radiation process in the atmosphere. Modified from Gambi [11].

atmosféricos como aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases atmosféricos.

Várias técnicas foram desenvolvidas para obtenção da solução exata da equação de transferência radiativa. Dentre elas pode-se citar os métodos que utilizam harmônicos esféricos, ordenadas discretas, técnica de Monte Carlo e diferenças finitas [12]. Estas técnicas necessitam um tempo computacional elevado, inviabilizando seu uso operacional. Como alternativa, foram desenvolvidos métodos aproximados que demandam um tempo computacional muito menor e possibilitam a obtenção de estimativas confiáveis de irradiação solar para utilização operacional e rotineira.

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 [13]. O modelo BRASIL-SR foi desenvolvido com base no modelo IGMK de autoria de pesquisadores do GKSS Forschungszentrum e descrito por Stuhlman et al. [14]. A Figura 4 mostra o fluxograma dos procedimentos executados para obtenção das estimativas de irradiação solar utilizando o modelo BRASIL-SR. A obtenção da estimativa do fluxo de radiação solar incidente na superfície é dividida em três etapas:

- tratamento dos dados climatológicos e das imagens de satélite;
- solução da equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de "Dois-Fluxos" [15];

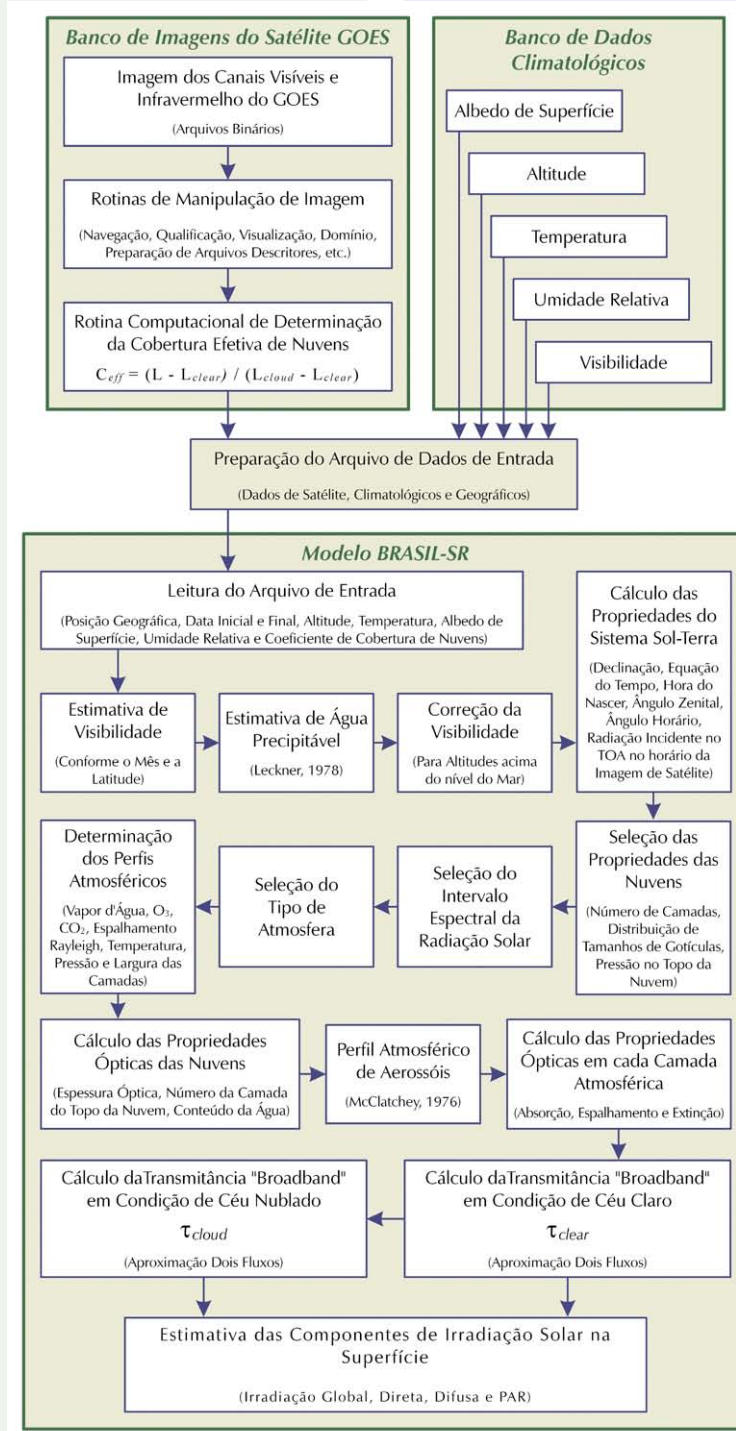


Figura 4. Fluxograma do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR.

Figure 4. Flowchart of the BRASIL-SR radiative transfer model.

- assimilation of climate and satellite data;
- solution of the radiative transfer equation using the "Two-Stream" approach [15];
- calculation of each solar radiation components (global, direct and diffused).

Several techniques were developed to obtain the exact solution of the radiative transfer equation. Among them, the methods which use spherical harmonics, discrete ordinates, the Monte Carlo technique and finite differences [12] can be pointed out. These techniques require a long computational time and impose a heavy demand of computing memory, which precludes their operational use. As an alternative, approximate methods were developed that demand less computing requirements and allow obtaining reliable solar radiation estimates for operational and routine purposes.

THE BRASIL-SR MODEL

The BRASIL-SR model is a physical model to obtain solar radiation incidence estimates on the surface that combines the "Two-Stream" approach to solve the radiative transfer equation along with climate data and satellite images [13]. The BRASIL-SR model is based on the IGMK model originally developed at the GKSS Forschungszentrum and described by Stuhlman et al. [14]. Figure 4 shows the flowchart of procedures carried out to obtain solar radiation estimates using the BRASIL-SR model. This procedure is divided into three phases:

- cálculo de cada uma das componentes do fluxo de radiação solar (global, direta e difusa).

A primeira etapa tem como objetivo preparar os dados de entrada necessários para alimentar o modelo. A base de dados necessária para tal é constituída de 6 variáveis: temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica, cobertura efetiva de nuvens e elevação da superfície. A descrição das características e propriedades da base de dados utilizada para alimentar o modelo será descrita em detalhes no próximo tópico.

Nas duas etapas seguintes, o modelo assume três hipóteses básicas:

- a cobertura de nuvens é o principal fator de modulação da transmitância atmosférica de modo que o modelo BRASIL-SR utiliza valores climatológicos das variáveis atmosféricas para estimar as demais propriedades óticas da atmosfera;
- o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas: céu claro e céu completamente encoberto^[11];
- o modelo assume, também, a existência de uma relação linear entre o fluxo de radiação solar global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera.

Dessa forma, o fluxo de radiação solar global incidente na superfície, Φ_g , pode ser obtido a partir de:

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

onde Φ_0 é a radiação incidente no topo da atmosfera, τ_{clear} e τ_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas em condições de céu claro e completamente nublado, respectivamente, e C_{eff} é a cobertura efetiva de nuvens dada pelas imagens de satélite:

$$C_{eff} = \frac{L - L_{clear}}{L_{cloud} - L_{clear}}$$

A leitura instantânea obtida para um pixel da imagem do satélite está representada por L e os índices “clear” e “cloud” referem-se à leitura em condições de céu claro e de céu encoberto por nuvens, respectivamente.

Dessa forma, a determinação do fluxo de radiação solar global incidente na superfície pode ser estimada a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à condição de céu claro, τ_{clear} , e a segunda refere-se à condição de céu totalmente encoberto, τ_{cloud} . A natureza estocástica do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é avaliada através do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens, C_{eff} . A componente τ_{clear} é função do albedo de superfície, do ângulo zenital solar e da espessura ótica dos constituintes atmosféricos. A componente τ_{cloud} é função do ângulo zenital solar, da espessura ótica e de propriedades óticas das nuvens. As

The assimilation phase has the purpose of preparing the required input data to feed the model. The required database comprises 6 variables: air temperature, surface albedo, relative humidity, atmospheric visibility, effective cloud coverage and surface elevation. The description of the characteristics and properties of the database used to feed the model will be described in detail in the next topic.

In both of the following phases the model assumes three basic premises:

- the cloud coverage is the main modulating factor of atmospheric transmittance so that the BRASIL-SR model uses climatologic values from the atmospheric variables to estimate the optical properties of the atmosphere;
- the solar radiation flux at the top of the atmosphere is linearly distributed between the two extreme atmospheric conditions: clear and overcast skies^[11];
- the model assumes a linear relationship between the global solar radiation flux at the surface and the radiation flux reflected at the top of the atmosphere.

In that way, the flux of global solar radiation at the surface, Φ_g , may be obtained from:

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

where Φ_0 is the radiation flux at the top of the atmosphere, τ_{clear} and τ_{cloud} are respectively the atmospheric transmittance for clear and overcast sky conditions and C_{eff} is the effective cloud cover index given by the satellite images:

$$C_{eff} = \frac{L - L_{clear}}{L_{cloud} - L_{clear}}$$

The instantaneous readout obtained for a satellite image pixel is represented by L and indices “clear” and “cloud” refer, respectively, to readings in clear and overcast skies.

In that way, the incidence of global solar radiation at the surface may be estimated from two independent components: the first component corresponds to clear sky condition, τ_{clear} , and the second to a completely overcast, τ_{cloud} . The random nature of solar radiation for any sky condition is evaluated through the effective cloud cover index, C_{eff} . The τ_{clear} component is a function of the surface albedo, the solar zenithal angle and the optical thickness of the atmosphere. The τ_{cloud} component is a function of the solar zenithal angle, the optical thickness and optical cloud properties. The two components may be estimated from the parameterization of the well-known physical processes by using climate data. To determine the transmittances τ_{clear} and τ_{cloud}

duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos. Para determinação das transmitâncias τ_{clear} e τ_{cloud} , o modelo utiliza 135 intervalos espectrais na faixa de radiação de ondas curtas (0 – 4 μ m) e adota 30 camadas atmosféricas na solução da equação de transferência radiativa.

Esse processo de linearização da radiação solar através da medida da cobertura efetiva de nuvens C_{eff} apresenta a grande vantagem de eliminar os efeitos da degradação natural que sempre ocorre nos radiômetros dos satélites que, de outra forma, poderiam levar a informações errôneas na análise e comparação de resultados de um ano para outro ou de um satélite para outro.

A irradiação solar difusa é determinada a partir da subtração da componente direta horizontal do total de irradiação solar incidente na superfície. 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:

$$DNI = \Phi_0 \cdot \tau_{atm-dir} \cdot \tau_{cloud-dir}$$

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 [14]:

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

$$\text{onde } \begin{cases} \tau_c = (CCI + 0,05) & \text{if } CCI < 0,95 \\ \tau_c = 1,0 & \text{if } CCI \geq 0,95 \end{cases}$$

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 espessura de cada camada atmosférica e os perfis atmosféricos de temperatura e da concentração dos gases atmosféricos (CO₂, O₃, etc.) são estabelecidos para a atmosfera-padrão selecionada em função da temperatura do ar na superfície (dado de entrada). Para a modelagem do vapor d’água, o modelo adota a parametrização de água precipitável descrita por Leckner [16]. O modelo utiliza o perfil continental de aerossóis atmosféricos, descrito por McClatchey [17] para altitudes de 0

the model uses 135 spectral intervals in the shortwave spectra (0 – 4 μ m) and adopts 30 atmospheric layers to solve the radiative transfer equation.

This scheme of linearization of the atmosphere transmittance through the effective cloud cover index C_{eff} presents the great advantage of eliminating the effects of natural degradation of the satellite radiometer response which, in some way, could carry on erroneous conclusions from analysis and comparisons of results from one year to the next or from one satellite to another.

The diffuse solar radiation is determined by subtracting the direct component from the global solar radiation at the horizontal surface. The horizontal direct irradiation (DNI) is estimated assuming that the absorption by clouds is not significant and that the contribution of scattering of the solar radiation by clouds may be added to the atmospheric transmittance in clear sky conditions. Thus, the direct component of solar irradiation is estimated using the expression below:

$$DNI = \Phi_0 \cdot \tau_{atm-dir} \cdot \tau_{cloud-dir}$$

where $\tau_{cloud-dir}$ represents the cloud transmittance and $\tau_{atm-dir}$ is the clear sky transmittance for the direct solar irradiation component. Transmittance $\tau_{cloud-dir}$ is estimated from the effective cloud cover index using the following approximation [14]:

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

$$\text{where } \begin{cases} \tau_c = (CCI + 0,05) & \text{if } CCI < 0,95 \\ \tau_c = 1,0 & \text{if } CCI \geq 0,95 \end{cases}$$

The transmittance $\tau_{atm-dir}$ refers to radiative processes involving aerosols and atmospheric gases in a clear sky condition. This transmittance is estimated through the solution of the radiative transfer equation using the “Two-Stream” approach.

The thickness of each atmospheric layer and the atmospheric profiles of temperature and atmospheric gas concentrations (CO₂, O₃, etc.) are established for the standard atmosphere selected as a function of the air temperature at the surface (input data). The scheme to model the water vapor adopts the parameterization of precipitable water described by Leckner [16]. The model employs the continental profile of atmospheric aerosols, described by McClatchey [17] for altitudes from 0 to 50 km, corrected for the first 5 km through climatologic visibility values.

With regards to cloud modeling, the BRASIL-SR model assumes that: (a) the cloud microphysics is represented by the droplets size distribution of the cloud type; (b) the clouds totally attenuate the direct radiation coming from the sun and (c) the clouds are vertically and

a 50 km, corrigido nos primeiros 5 km de altitude com base em valores climatológicos de visibilidade.

Com relação à modelagem das nuvens, o modelo BRASIL-SR assume que: (a) a microfísica de nuvens é representada pela distribuição de tamanhos de gotículas do tipo de nuvem presente; (b) as nuvens atenuam totalmente a radiação direta proveniente do Sol e (c) as nuvens são vertical e horizontalmente homogêneas. Para o mapeamento apresentado neste Atlas, foi adotado que toda a cobertura de nuvens é formada por um único tipo de nuvens – Altostratus – com a base das nuvens em 500 mb e uniformemente distribuída em 2 camadas atmosféricas. Estudos anteriores mostraram que as nuvens Altostratus são o tipo de nuvem espessa mais freqüente nas áreas continentais situadas no intervalo de latitudes em que o Brasil se localiza ^[18]. O modelo utiliza a parametrização de Stephens ^[19] para determinar o coeficiente de extinção total e o conteúdo total de água líquida na nuvem. A espessura ótica das nuvens em cada uma das camadas atmosféricas em que estão presentes é determinada assumindo que o conteúdo total de água presente na nuvem está isotropicamente distribuído.

horizontally homogenous. For the solar irradiation mapping, it was assumed that the entire cloud coverage is formed by a single type of cloud - Altostratus - with their base at 500 mb and uniformly distributed in 2 atmospheric layers. Previous studies showed that Altostratus clouds are the most common cloud type in continental areas in the latitude range where Brazil is located ^[18]. The model uses the Stephens ^[19] parameterization to determine the total extinction coefficient and the total liquid water content of the cloud. The optical cloud thickness in each layer of the atmosphere where they are present is determined by assuming that the total amount of water in the cloud is isotropically distributed.

BASE DE DADOS

O modelo BRASIL-SR fornece estimativas de fluxo de radiação solar na superfície utilizando informações de nebulosidade extraídas de imagens de satélite geoestacionário e de dados climatológicos de variáveis ambientais para modelar a composição da atmosfera e os processos radiativos que nela ocorrem. Dessa forma, uma extensa base de dados de satélite e dados coletados em superfície foi necessária para o mapeamento do fluxo de radiação solar incidente no território brasileiro.

Além disso, uma base de dados confiável e de alta qualidade de irradiação solar em superfície é essencial para a validação das estimativas fornecidas pelo modelo de transferência radiativa. Assim, este tópico apresenta, inicialmente, os procedimentos adotados para geração da base de dados de alimentação do modelo e, posteriormente, descreve as redes de estações de superfície utilizadas para coleta de dados de irradiação solar no território brasileiro.

DADOS DE SATÉLITE

O banco de imagens de satélite é composto por imagens do satélite GOES-EAST do período entre 1995 a 2005 fornecidas pela Divisão de Satélite Ambientais do CPTEC/INPE. Nesse período dois satélites diferentes da série GOES ocuparam a posição 75°W sobre a linha do Equador: GOES-8 e GOES-12. O procedimento para tratamento das imagens e determinação dos valores do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens foi padronizado para atender ambos os satélites. No entanto, durante o período entre julho/1995 e março/2003 em que o satélite GOES-8 esteve em operação, as imagens de toda a América do Sul estavam disponíveis apenas para 5 horários diários com resolução temporal de 3 horas. Após a entrada em operação do satélite GOES-12, a resolução temporal foi refinada chegando a atingir o recebimento de duas imagens da região por hora. Apesar da melhor resolução temporal, cada imagem disponível consistia de uma composição de duas imagens adquiridas em horários diferentes: imagem setentrional {(18N, 84W) a (20S, 30W)} e imagem austral {(20S, 84W) a (45S, 30W)}. A diferença de horário entre elas pode atingir 20 minutos e o horário da imagem composta é definido como a média dos horários das imagens parciais do continente. Além da resolução temporal, a resolução espacial das imagens disponíveis dos dois satélites é diferente. As imagens do GOES-

DATABASE

The BRASIL-SR model provides estimates of solar radiation flux at surface using information of cloud coverage extracted from geostationary satellite images along with climate data from environmental variables to model the composition of the atmosphere and radiative processes. In this way an extensive base of satellite data and data collected on the surface was necessary to map the solar radiation flux in the Brazilian territory.

In addition, a reliable and high quality database on surface solar irradiation is essential to validate the data supplied by the radiation transfer model. Thus, this topic initially presents the procedures adopted to generate the database to feed the model and afterwards describes the surface station networks used to collect the solar irradiation data in the Brazilian territory.

SATELLITE DATA

The satellite database is composed by satellite images from the GOES-EAST satellite for the period between 1995 and 2005 supplied by the Environmental Satellite Division of the CPTEC/INPE. Within this period two different satellites of the GOES series occupied the 75°W position over the Equator: GOES-8 and GOES-12. The procedure to manipulate the images and determine the values for the effective cloud cover index was standardized to match both satellites. However, during the period between July 1995 and March 2003 in which the GOES-8 satellite was in operation, the images for the South America territory were available for only 5 daily time schedules with a temporal resolution of 3 hours. After the GOES-12 satellite entered into operation the temporal resolution was refined reaching two images of the region per hour. In spite of the improved temporal resolution each GOES-12 image available consisted of a composition of two images collected at different times: a northerly image {(18N, 84W) a (20S, 30W)} and a southerly image {(20S, 84W) a (45S, 30W)}. The time difference between them could reach 20 minutes and the time of the composite image is defined as the average between the partial images. In addition to the temporal resolution the spatial resolution of the available images of both satellites is different.

8 apresentam uma resolução aproximada de 10x10km, enquanto que as imagens do GOES-12 foram disponibilizadas em resolução 4x4km.

O tratamento das imagens dos satélites inclui o recebimento, a qualificação, a reamostragem e a extração da informação de cobertura efetiva de nuvens. Para determinação do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens (C_{eff}) é necessária a composição de imagens de céu claro e de céu encoberto por meio de análise estatística de imagens do período de interesse. Os valores C_{eff} não representam apenas fração do céu que se apresenta com cobertura de nuvens, mas uma composição desta fração com as propriedades óticas das nuvens de modo que o céu coberto com nuvens Cirros apresentará um valor de C_{eff} diferente do céu encoberto por nuvens Altostratus.

DADOS CLIMATOLÓGICOS

TEMPERATURA E VISIBILIDADE

As informações de temperatura e a visibilidade para a o Brasil foram obtidas da base de dados “Global Surface Summary of Day Data” desenvolvida e mantida pelo National Climatic Data Center (NCDC) - <http://www.ncdc.noaa.gov/> ou <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/>. A Figura 5 apresenta a localização das 95 estações de medição existentes no território brasileiro das quais os dados disponíveis foram utilizados. Segundo o NCDC, a base de dados disponível foi submetida a um rigoroso programa de qualidade dos dados. Ainda assim, durante o desenvolvimento do Projeto SWERA, uma análise exploratória desta base de dados foi realizada com o emprego de um algoritmo para identificação de possíveis problemas decorrentes do emprego de sistema de unidades diferentes em algumas estações de medida e valores causados por ruídos.

A etapa seguinte à análise exploratória dos dados foi a aplicação de um método de interpolação espacial com o intuito de produzir valores climatológicos mensais de temperatura e visibilidade para cada ponto da imagem do satélite GOES. A Figura 6 apresenta, a título de ilustração, o mapa resultante da interpolação espacial dos valores médios anuais da temperatura observados em cada estação de coleta de dados. A Figura 7 apresenta o resultado obtido para a visibilidade seguindo metodologia similar. O método de interpolação empregado foi o de Krigging, assumindo a hipótese de isotropia no ajuste do semivariograma. Um estudo da confiabilidade dos resultados obtidos na interpolação foi desenvolvido em razão da distribuição não-homogê-



Figura 5. Localização das estações da base de dados do NCDC.

The images of GOES-8 present an approximate resolution of 10x10km where the images of GOES-12 were sent in a 4x4km resolution.

The treatment of satellite images includes their acquisition, qualification, re-sampling and the extraction of the effective cloud coverage (C_{eff}). To determine the effective cloud cover index it is necessary to compose images of a clear and overcast sky through a statistical analysis of the period of interest. The values C_{eff} do not represent only the portion of sky with cloud coverage but also includes information on the cloud optical properties. For that reason, a sky overcast with Cirrus clouds will present a C_{eff} value different from a sky overcast with Altostratus clouds.

CLIMATE DATA

TEMPERATURE AND VISIBILITY

The temperature and visibility information for Brazil were obtained from the “Global Surface Summary of Day Data” database developed and maintained by National Climatic Data Center (NCDC) - <http://www.ncdc.noaa.gov/> or <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/>. Figure 5 shows the location of the 95 measuring stations that exist within the Brazilian territory from which the available data were used. According to the NCDC the available database was subjected to a rigorous data quality treatment. Even so, during the development of the SWERA Project, an exploratory analysis of the database was performed by using an algorithm to identify possible problems resulting from the use of different measurement units in some stations and bad data.

The phase following the exploratory analysis of the data was the application of a space interpolation method aimed at producing mon-thly climate values for temperature and visibility for each point of the GOES satellite image. Figure 6 shows, as an illustration, the map re-sulting from the space interpolation of the annual average values for temperature observed at each data collecting station. Figure 7 shows the results obtained for visibility following a similar methodology. The interpolation method used was Krigging, assuming the isotropic hypothesis when adjusting the semivariogram. A data consistency study of the results obtained through the interpolation was developed because of the non-homogeneous distribution of the ground stations inside the

nea das estações de superfície no território brasileiro e mostrou boa concordância com os valores medidos mesmo na região com menor densidade de estações.

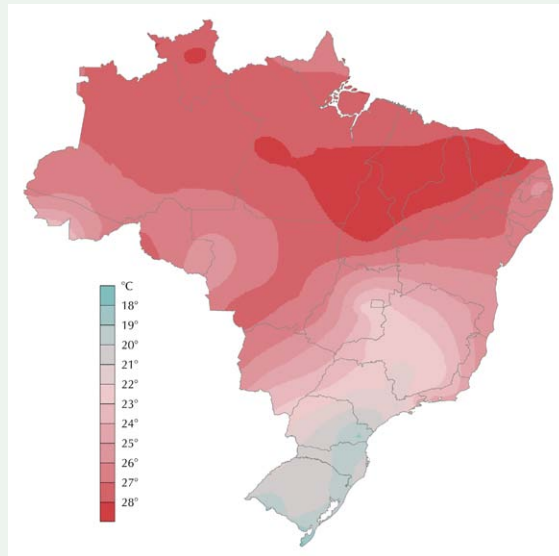


Figura 6. Mapa da média anual de temperatura obtido por interpolação Kriging.

Figure 6. Map for annual mean of temperature obtained by Kriging interpolation.

ALBEDO DE SUPERFÍCIE

O albedo de superfície é função da refletância da camada de cobertura do solo e de seu uso. Essa refletância varia no transcorrer do ano dependendo do estágio de crescimento da vegetação, estação do ano e variações inter-anuais do clima.

A base de dados de albedo utilizada neste trabalho foi obtida através do modelo desenvolvido por Sellers et al. [20] que calcula o albedo de superfície em vários intervalos espectrais. Esse modelo é alimentado por medidas do “Índice de Vegetação por Diferença Normalizada” (IVDN) obtidas por satélite e outros parâmetros biofísicos relacionados ao tipo de vegetação [21]. Assim, os dados obtidos para o albedo de superfície representam valores médios mensais durante o ciclo diurno. Essa base de dados está disponível em <ftp://daac.gsfc.nasa.gov/> e é fornecida na forma de uma grade regular com resolução $1^\circ \times 1^\circ$. A Figura 8 apresenta, a título de ilustração, o mapa da média anual de albedo produzido na mesma resolução espacial das imagens do satélite GOES-12 utilizando o método do vizinho mais próximo para a interpolação.

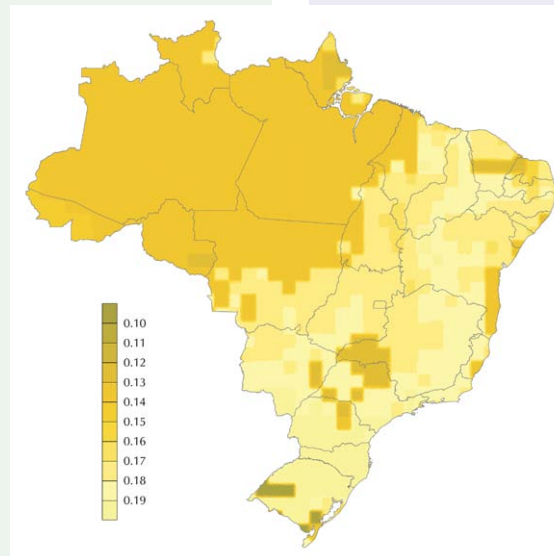


Figura 8. Mapa da média anual de albedo de superfície obtido por interpolação de vizinho mais próximo.

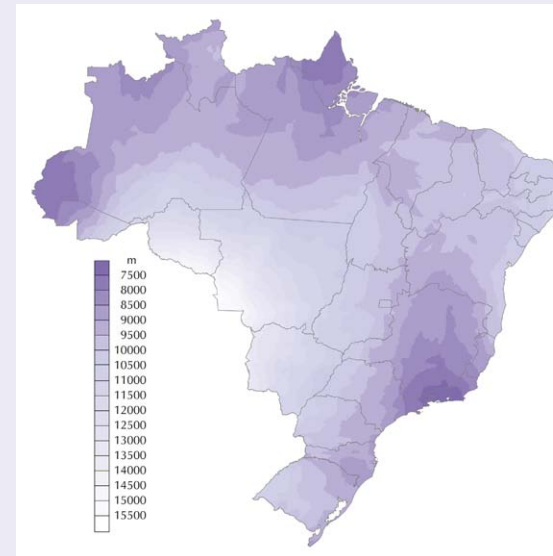


Figura 7. Mapa da média anual de visibilidade obtido por interpolação Kriging.

Figure 7. Map for annual mean of visibility obtained by Kriging interpolation.

SURFACE ALBEDO

The surface albedo is a function of the reflectance of the soil cover layer and its land use. This reflectance varies during the year depending on the vegetation growth stage, the season and inter-annual climate variations.

The albedo database used in the development of this Atlas was obtained through the model developed by Sellers et al. [20] which calculates the surface albedo for various spectral intervals. This model is fed by measurements obtained by satellite of the “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) and other biophysical parameters related to the type of vegetation [21]. The data obtained for the surface albedo represent average monthly values during the day cycle. This database is available in <ftp://daac.gsfc.nasa.gov/> and it is supplied in form of a regular grid with a $1^\circ \times 1^\circ$ resolution. Figure 8 shows, as an illustration, the map of the annual average of albedo produced at the same spatial resolution of the GOES-12 satellite images using the “nearest neighbor” interpolation method.

Brazilian territory. It showed good agreement with the measured values even for regions with a lower density of stations.

UMIDADE RELATIVA

A umidade relativa é a relação entre a razão de mistura de vapor d'água observada na atmosfera e aquela que prevaleceria em condições saturadas à mesma temperatura. Os valores de umidade relativa utilizados pelo modelo BRASIL-SR estão disponíveis em <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/>, portal do International Research Institute for Climate Prediction (IRI). Essa base de dados contém médias mensais em uma grade regular com resolução de 2,5° x 2,5° e abrange o período de 1960 até 2002. A Figura 9 apresenta, a título de ilustração, o mapa da média anual de umidade relativa produzido por interpolação pelo método do vizinho mais próximo.

ALTITUDE

Os dados de altitude para todo o território brasileiro foram obtidos a partir da base GTOPO30 disponibilizada pelo Earth Resources Observation and Science (EROS) Data Center/United States Geological Survey (USGS). Esta base de dados está disponível em formato de grade com resolução de arco de 30s (aproximadamente 1km) e precisão do detalhamento topográfico da ordem de 100m, mais do que adequada para fins de modelamento da radiação solar. A Figura 10 apresenta o mapa de elevações para todo o território brasileiro.

DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

As estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR foram validadas por meio de comparação com valores medidos em superfície em estações distribuídas pelo território brasileiro. Foram utilizados dados coletados em estações da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o setor de energia) e dados medidos em plataformas de coleta de dados (PCD). Ambas as redes de coleta de dados foram implantadas e são gerenciadas pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). As bases de dados coletados em ambas as redes estão disponíveis para acesso no sítio <http://www.cptec.inpe.br/>.

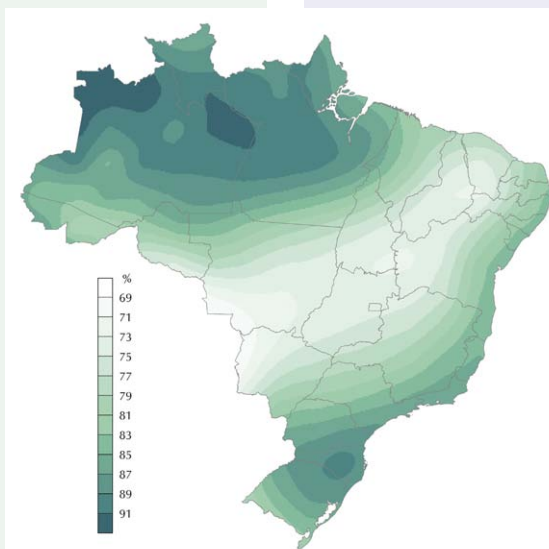


Figura 9. Mapa da média anual de umidade relativa obtido por interpolação de vizinho mais próximo.

Figure 9. Map for annual mean of relative humidity obtained using the "nearest neighbor" interpolation technique.

RELATIVE HUMIDITY

The relative humidity is the relationship between the water vapor mixture ratio observed in the atmosphere and that which would prevail in saturated conditions at the same temperature. The relative humidity values are available in <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/>, International Research Institute for Climate Prediction (IRI) site. This database contains monthly averages in a regular grid with a 2,5° x 2,5° resolution and it covers the period from 1960 to 2002. Figure 9 shows, as an illustration, the annual average map of the relative humidity prepared by interpolation using the method of the nearest neighbor.

ALTITUDE

The altitude data for Brazilian territory were obtained from the GTOPO30 database made available by Earth Resources Observation and Science (EROS) Data Center/United States Geological Survey (USGS). This database is available in a grid form with resolution of 30s (approximately 1km) and topographic precision up to 100m, which is more than adequate for solar radiation modeling. Figure 10 shows the elevations map for the entire Brazilian territory.

SOLAR IRRADIATION DATA

The solar irradiation estimates supplied by the BRASIL-SR model were validated through a comparison with measured values at the ground stations spread throughout the Brazilian territory. Ground data were collected by the SONDA (National Organization of Environmental Data System) network stations and by automatic weather stations (AWS). Both networks were set up and managed by the Center for Weather Forecast and Climate Studies (CPTEC/INPE). The database acquired in both networks is available at the <http://www.cptec.inpe.br/> site.



Figura 10. Imagem de relevo gerada por interpolação (vizinho mais próximo) da base de dados GTOPO30.

Figure 10. Topography image obtained from the "nearest neighbor" interpolation of the GTOPO30 database.

Tabela 1. Estações da rede SONDA utilizadas na etapa de validação do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR.

Estação	Localização (lat/long)	Período de Dados	Observações
Petrolina (PE)	09°04'S / 40°19'W	2005	Localizada na região Nordeste
Caicó (RN)	01°55'S / 37°05'W	2004/2005	Implantada pelo Projeto SWERA e incorporada ao Projeto SONDA em 2005 Localizada na região Nordeste
Ouro Preto d'Oeste (RO)	10°52'S / 61°58'W	2005	Localizada na região Norte
Cuiabá (MT)	15°33'S / 56°04'W	2004/2005	Localizada na região Centro-Oeste
Brasília (DF)	15°36'S / 47°42'W	2005	Localizada na região Nordeste
Campo Grande (MS)	20°26'S / 54°32'W	2004/2005	Localizada na região Centro-Oeste
Florianópolis (SC)	27°36'S / 48°30'W	2000/2005	Incluída na rede BSRN desde 2000 e incorporada ao Projeto SONDA em 2005 Localizada na região Sul
São Martinho da Serra (RS)	29°26'S / 53°49'W	2004/2005	Localizada na região Sul

REDE SONDA

A Tabela 1 apresenta uma descrição das estações da rede SONDA utilizadas na etapa de validação das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR. O critério para a seleção das estações SONDA foi a extensão da série de dados disponíveis. A rede SONDA teve início com a implantação da estação localizada em São Martinho da Serra (RS) no segundo semestre de 2004. Muitas estações foram implantadas ou incorporadas à rede desde então.

A instrumentação e sensores instalados nas estações SONDA são equipamentos de primeira linha de reconhecida confiabilidade no meio científico. Os dados de irradiação solar global e direta são coletados com sensores Kipp&Zonen CM21 e Eppley NIP, respectivamente. Os dados coletados nas estações da rede SONDA são submetidos a um rígido controle de qualidade que utiliza critérios estabelecidos pela World Meteorological Organization (WMO) para as estações da rede Baseline Solar Radiation Network (BSRN) [22]. A Figura 11 apresenta fotos das instalações das estações em Brasília (DF) e São Martinho da Serra (RS).



Figura 11. (a) Módulo de medidas da estação SONDA em Brasília com os sensores de radiação instalados sobre o teto; (b) Plataforma com os sensores de radiação na estação SONDA em São Martinho da Serra; e (c) Plataforma de coleta de dados

Table 1. The SONDA sites used to validate solar estimates provided by the BRASIL-SR radiative transfer model.

SONDA NETWORK

Table 1 shows a description of the SONDA network stations used in the validation step of the solar irradiation estimates provided by the BRASIL-SR model. The criteria used for selecting the SONDA stations was the time extension of the data series available. The SONDA network started with the implementation of the measurement site located at São Martinho da Serra (RS) during the second half of 2004. Many sites were set up or incorporated into the network after that.

The instrumentation and sensors installed at the SONDA stations are first class equipment of certified reliability. The global and direct solar irradiation data are collected with Kipp&Zonen CM21 and Eppley NIP sensors, respectively. The data collected at the SONDA network stations are subjected to a rigid quality control to allow that uses criteria established by World Meteorological Organization (WMO) for stations of the Baseline Solar Radiation Network (BSRN) network [22]. Figure 11 exhibits photos of stations located in Brasília (DF) and São Martinho da Serra (RS).

Figure 11. (a) Container of the SONDA site in Brasília with the radiation sensors installed above the ceiling; (b) Platform with the radiation measurement sensors installed at the SONDA site in São Martinho da Serra; and (c) Automatic weather station (AWS) in Paraná.

REDE DE PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS (PCD)

A base de dados da rede SONDA, embora de alta qualidade e confiabilidade, ainda é bastante reduzida temporal e espacialmente. A série de dados tem início no segundo semestre de 2004, com exceção da estação de Florianópolis que já operava sob a coordenação do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina antes de sua incorporação à rede SONDA. Além disso, a estação de referência prevista para a região Sudeste, em Cachoeira Paulista, ainda não se encontra em operação.

A rede de PCD operada pelo CPTEC/INPE, com estações distribuídas por todo o território brasileiro, foi utilizada no processo de validação com o intuito de expandir sua abrangência temporal e espacial da base de dados de superfície e permitir uma avaliação mais completa da confiabilidade do modelo. A Tabela 2 apresenta a distribuição das estações em cada uma das regiões geográficas do território brasileiro e a extensão temporal da série de dados disponíveis. Apesar de não contar com sensores de primeira linha, estudos anteriores mostraram que instrumentos LI-COR e sensores de primeira linha (Kipp&Zonen e Eppley) apresentam performance similar quando procedimentos de operação e manutenção das estações são realizados adequadamente ^[23]. A Figura 11(c) mostra uma PCD operando no Paraná.

Tabela 2. Número de PCD utilizadas para validação do modelo BRASIL-SR.

Região Brasileira	Número de Estações	Período de Dados
Norte	11	2002 a 2005
Nordeste	13	2003 a 2005
Centro-Oeste	25	2002 a 2005
Sudeste	38	2002 a 2005
Sul	11	2004 a 2005

NETWORK OF AUTOMATIC WEATHER STATIONS (AWS)

Although the high quality and reliability of the SONDA database, it is very limited in time and space. The data series starts on the second semester of 2004 with exception of the Florianópolis station which already operated under the coordination of the Solar Energy Laboratory of the Federal University of Santa Catarina before its incorporation into the SONDA network. In addition, the measurement site planned for the Southeastern region, in Cachoeira Paulista, is still not operational.

Data provided by AWS network, with sites spread throughout the Brazilian territory, were employed in the validation process in order to cover a larger area and time period of the surface database allowing for a more complete evaluation of the model's reliability. Table 2 shows the station distribution in each Brazilian regions and the temporal extension of the data series available. In spite of not owning first grade sensors, former studies demonstrated that LI-COR instruments and first grade sensors (Kipp&Zonen and Eppley) present similar performance whenever the station's operation and maintenance are adequately performed ^[23]. Figure 11(c) shows an AWS operating in Paraná.

Table 2. The AWS sites used to validate solar data provided by the BRASIL-SR.

NÍVEIS DE CONFIABILIDADE DAS ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

O levantamento dos níveis de confiabilidade do modelo BRASIL-SR foi realizado pela avaliação dos desvios apresentados pelos valores estimados para o fluxo de radiação solar em relação aos valores medidos na superfície (verdade terrestre). Esse levantamento foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa foi realizada uma intercomparação entre os modelos de transferência radiativa adotados pelo Projeto SWERA para o mapeamento do potencial solar nos vários países participantes do projeto com a adição do modelo HELIOSAT como “benchmark”, por ser um modelo conhecido e amplamente empregado na Comunidade Européia. Na segunda etapa as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR foram comparadas com valores medidos em superfície em diversas estações solarimétricas distribuídas por todo território nacional.

INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS

A intercomparação incluiu o modelo BRASIL-SR e os seguintes modelos de transferência radiativa:

- HELIOSAT - utilizado no mapeamento dos recursos solares na Europa ^[24];
- SUNNY/ALBANY - desenvolvido pela State University of New York ^[25, 26, 27];
- DLR - desenvolvido no Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt ^[28].

A metodologia para realização da intercomparação empregou dados de total diário coletados nas estações de Florianópolis (SC), Balbina (AM) e Caicó (RN). Estas estações foram escolhidas em razão da qualidade dos dados fornecidos e climatologia do local onde estão situadas. Os dados de superfície utilizados na intercomparação foram coletados no período de novembro/2002 a março/2003. Nesse período os dados do Projeto SONDA ainda não estavam disponíveis.

A estação localizada em Caicó foi instalada no segundo semestre de 2002 especificamente para atender a essa etapa do Projeto SWERA. A

RELIABILITY LEVELS OF SOLAR IRRADIATION ESTIMATES

The assessment of reliability levels of the BRASIL-SR model were performed through the evaluation of the deviations shown by the estimated values for solar radiation flux vis-à-vis the values measured at the surface (ground truth). This evaluation was done in two phases. The first phase consisted in an inter-comparison between the core radiation transfer models adopted by the SWERA Project to map the solar energy in the various countries participating in the project. The HELIOSAT model took part in this phase like benchmark due to its employment to map solar energy resources in countries from European Union. In the second phase, the solar flux estimates provided by the BRASIL-SR model were compared with measured values acquired at several solarimetric stations spread along the Brazilian territory.

MODEL INTER-COMPARISON

The inter-comparison step included the BRASIL-SR model and the following radiation transfer models:

- HELIOSAT - used for mapping solar resources in Europe ^[24];
- SUNNY/ALBANY - developed by the State University of New York ^[25, 26, 27];
- DLR - developed by the Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt ^[28].

The methodology to perform the inter-comparison employed data from daily totals collected at Florianópolis (SC), Balbina (AM), and Caicó (RN). These stations were selected because of the data quality and the distinct climate conditions where they are located. The surface data used for the inter-comparison were collected from November 2002 to March 2003. During this period the ground data from Project SONDA were not yet available.

The station located in Caicó was installed during the second semester of 2002 in order to provide ground data for this task of the SWERA Project. The Caicó location was selected due to the preponderance of

localização de Caicó foi definida em função da preponderância de dias com baixa nebulosidade durante o ano ^[29], ideal para a comparação do comportamento dos modelos em relação à parametrização dos processos radiativos típicos de condições de céu claro. A estação de Balbina está localizada próximo à usina hidrelétrica de mesmo nome na região amazônica. A climatologia da região é fortemente influenciada pela “Zona de Convergência Intertropical” (ZCIT), sendo que a precipitação pluviométrica é elevada e a quantidade de dias de céu claro é pequena ao longo do ano. A estação de Florianópolis já atendia aos padrões estabelecidos para a rede BSRN (Baseline Solar Radiation Network) para coleta e qualificação dos dados coletados. A climatologia de Florianópolis apresenta dias de céu claro e encoberto bem distribuídos ao longo do ano.

Nas três estações foram utilizados piranômetros Kipp&Zonen CM21 e pirheliômetros NIP da Eppley para a medida de irradiação global e da componente direta normal do fluxo de radiação solar, respectivamente. Os resultados da intercomparação mostraram um desempenho semelhante de todos os modelos para as três localidades. O modelo BRASIL-SR apresentou desvios médios e quadráticos para o total diário de fluxo de radiação solar comparáveis estatisticamente aos apresentados pelos demais modelos envolvidos na intercomparação, inclusive o modelo HELIOSAT que utilizou imagens do METEOSAT com resolução temporal horária, enquanto as imagens do GOES-8 disponíveis para o modelo BRASIL-SR apresentavam uma resolução temporal de 3 horas ^[30, 31].

COMPARAÇÃO COM DADOS DE SUPERFÍCIE

A segunda etapa de avaliação dos níveis de confiabilidade do modelo BRASIL-SR foi feita pela validação das estimativas do modelo com base nos dados de irradiação solar coletados em estações de superfície distribuídas pelo território brasileiro. Aqui estão apresentados os resultados da validação para cada uma das cinco regiões geográficas brasileiras.

VALIDAÇÃO DA IRRADIAÇÃO GLOBAL

Foram utilizados dados coletados em oito estações da rede SONDA, apresentadas na Tabela 1, e em 98 estações da rede de PCD distribuídas no território brasileiro, conforme descrito na Tabela 2. Os resultados estão apresentados por região geográfica do Brasil.

Os gráficos de dispersão, apresentados na Figura 12 para cada uma das regiões brasileiras, permitem a comparação entre as estimativas fornecidas pelo modelo com valores medidos em superfície. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos para cada uma das regiões brasileiras.

clear sky days throughout the year ^[29], which is ideal for comparing the model behavior with regards to the parameterization of typical radiative processes for clear sky conditions. The Balbina site is located close to the hydroelectric power plant of the same name in the Amazon region. The climatology of the region is strongly influenced by the Inter-tropical Convergence Zone (ITCZ), with a high precipitation and a few clear sky days throughout the year. The Florianópolis site already reached the established requirements by the BSRN (Baseline Solar Radiation Network) network for collection and qualification of ground data. The climatology of Florianópolis exhibits days with clear sky and overcast well distributed all over the year.

At the three stations Kipp&Zonen CM21 pyranometers and NIP pirheliometers from Eppley were used respectively to measure the global irradiation and the direct normal component of the solar radiation flux. The results of the inter-comparison showed a similar performance of all models for all three locations. The BRASIL-SR model showed mean bias and root mean square deviations for the daily total solar radiation flux statistically comparable to those exhibited by the other core models involved in the inter-comparison, including the HELIOSAT model which used METEOSAT images with much better temporal resolution (hourly), while the GOES-8 images available for the BRASIL-SR model exhibited a temporal resolution of 3 hours ^[30, 31].

COMPARISON WITH GROUND DATA

The second phase of the reliability evaluation was done by the validation of the model's estimates based on solar irradiation data collected at ground sites dispersed throughout the Brazilian territory. Here are shown the validation results of the estimates for global and direct solar irradiation for the 5 geographical Brazilian regions.

VALIDATION OF GLOBAL RADIATION

Data collected at eight stations of the SONDA network (Table 1) and at 98 sites of the AWS network distributed within the Brazilian territory as described in Table 2 were used in validation step. The results are exhibited for each geographic region of Brazil.

The plots shown on Figure 12 for each Brazilian geographical region allow a comparison between the BRASIL-SR estimates and the ground data values. Table 3 shows a summary of the results obtained for each of the Brazilian regions.

O modelo BRASIL-SR apresentou um desempenho similar em todas as regiões geográficas do país, com uma ligeira superestimativa do fluxo de radiação. 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 e as características climáticas de cada região.

Os histogramas apresentados na Figura 13 mostram que ocorreu uma maior dispersão dos desvios entre valores medidos e estimados na região Sudeste e Centro-Oeste. Um dos fatores que podem estar relacionados a essa dispersão é a ocorrência de queimadas durante a estação seca (maio a outubro) que atinge com maior intensidade essas regiões.

Os valores dos desvios quadráticos médios (rRMSE) apresentados na Tabela 3 mostram a dispersão dos pontos em relação à linha diagonal dos gráficos de dispersão. Essa linha diagonal representa a condição ideal na qual os valores estimados seriam iguais aos valores medidos em superfície. A região Norte apresentou os maiores valores para o rRMSE devido à característica climática da região amazônica que apresenta maior nebulosidade do que as demais regiões em razão da influência da ZCIT.

Tabela 3. Desvios observados para as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

Região Brasileira	Desvio Médio em Wh/m ² (MBE)	Desvio-padrão do MBE em Wh/m ²	Desvio Médio Relativo (rMBE)	Desvio Quadrático Médio Relativo (rRMSE)	Fator de Correlação
Norte	353,48	640,29	0,07	0,15	0,85
Nordeste	306,75	631,10	0,06	0,13	0,97
Centro-Oeste	272,11	669,80	0,05	0,13	0,89
Sudeste	249,10	662,74	0,05	0,14	0,93
Sul	259,49	546,71	0,05	0,12	0,97

Figura 12. Comparação entre as estimativas do 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 Centro-Oeste, (d) na região Sudeste e (e) na região Sul.

Table 3. Deviations observed for the BRASIL-SR estimates for each of the Brazilian regions.

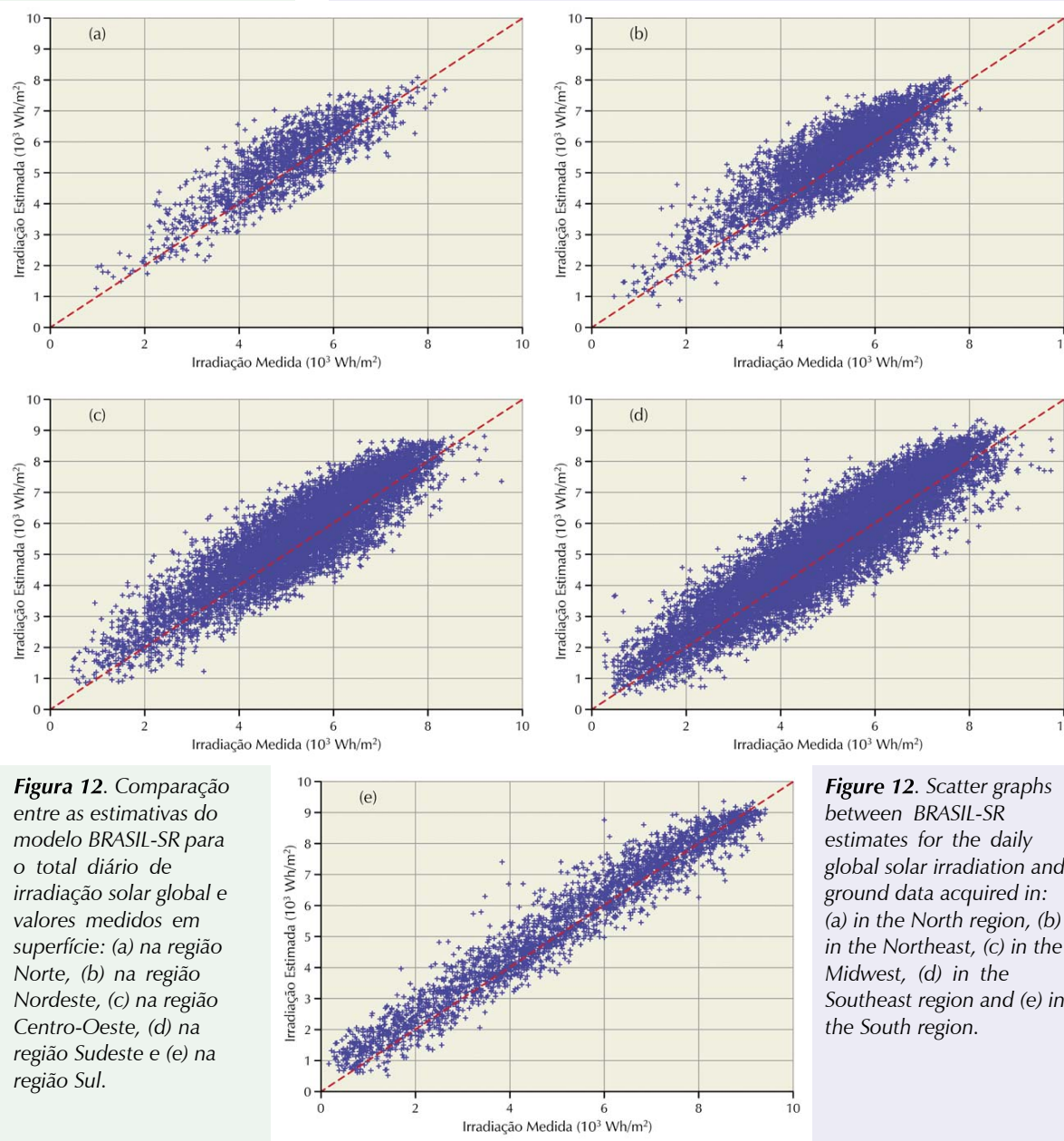


Figure 12. Scatter graphs between BRASIL-SR estimates for the daily global solar irradiation and ground data acquired in: (a) in the North region, (b) in the Northeast, (c) in the Midwest, (d) in the Southeast region and (e) in the South region.

The BRASIL-SR model showed a similar performance in all geographic regions of the country with a slight overestimation of the solar flux. This overestimation is slightly greater for cloudy sky conditions, i. e. when the solar radiation flux is lower. The greatest relative mean bias error (rMBE) - the ratio between the mean bias error and the mean daily irradiation - was observed in the Northern region. However, the difference between the errors observed in the different regions is not significant, probably, due to the difference in the amount of data and the number of ground sites available in each region as well as the climate characteristics of each region.

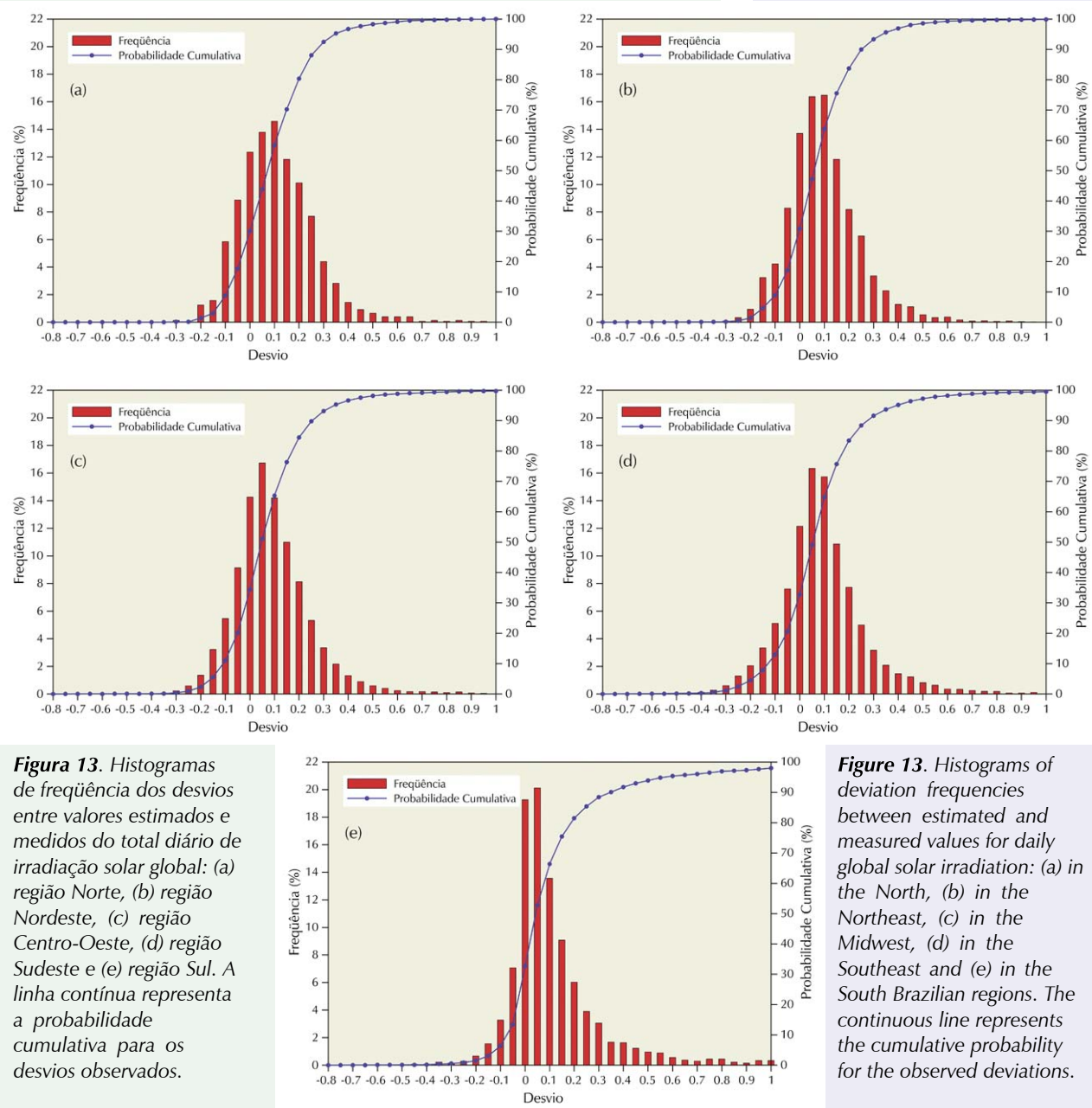


Figura 13. Histogramas de frequência dos desvios entre valores estimados e medidos do total diário de irradiação solar global: (a) região Norte, (b) região Nordeste, (c) região Centro-Oeste, (d) região Sudeste e (e) região Sul. A linha contínua representa a probabilidade cumulativa para os desvios observados.

Figure 13. Histograms of deviation frequencies between estimated and measured values for daily global solar irradiation: (a) in the North, (b) in the Northeast, (c) in the Midwest, (d) in the Southeast and (e) in the South Brazilian regions. The continuous line represents the cumulative probability for the observed deviations.

VALIDAÇÃO DA DNI

A validação das estimativas de irradiação direta normal 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 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

Tabela 4. Desvios apresentados pelas estimativas de irradiação direta normal fornecidas pelo BRASIL-SR.

Estação	Desvio Médio em Wh/m ² (MBE)	Desvio-padrão do MBE em Wh/m ²	Desvio Médio Relativo (rMBE)	Desvio Quadrático Médio Relativo (rRMSE)	Fator de Correlação
São Martinho da Serra (RS)	353,48	640,29	0,07	0,15	0,85
Florianópolis (SC)	306,75	631,10	0,06	0,13	0,97
Petrolina (PE)	272,11	669,80	0,05	0,13	0,89

Table 4. Deviations presented by direct normal radiation estimates provided by BRASIL-SR model.

The histograms exhibited on Figure 13 show a larger spreading of the deviations in Southeast and Midwest regions. One of the factors for this may be related to the occurrence of biomass burning events that is more frequent in those regions during the dry season (May through October).

The values of the root mean square errors (rRMSE) presented on Table 3 show the scattering of points in regards to the diagonal line presented in the scatter plots. The North region presented the greatest values for the rRMSE due to the Amazon region's climate characteristics, which exhibits higher nebulosity due to the ITCZ influence.

VALIDATION OF DNI

The validation of the direct normal irradiation estimates used ground data collected at the SONDA network sites located in Petrolina (PE), Florianópolis (SC) and São Martinho da Serra (RS). The AWS's and the other SONDA sites do not have a pirheliometer to acquire the direct solar irradiation data. The SONDA site in Brasília is equipped with a pirheliometer but the equipment exhibited technical problems and its data was discarded.

equipamento apresentou problemas inviabilizando sua utilização .

A Tabela 4 apresenta os valores dos desvios observados em cada uma das três estações de medida. O desvio médio apresentado é da mesma ordem de grandeza dos desvios apresentados por outros modelos em uso pela comunidade científica [32]. A estação de Florianópolis apresentou os maiores desvios e supõe-se que isso se deva ao fato de estar localizada em área urbana. A Figura 14 apresenta o gráfico de dispersão entre valores medidos e estimados da irradiação direta normal e o histograma dos desvios observados.

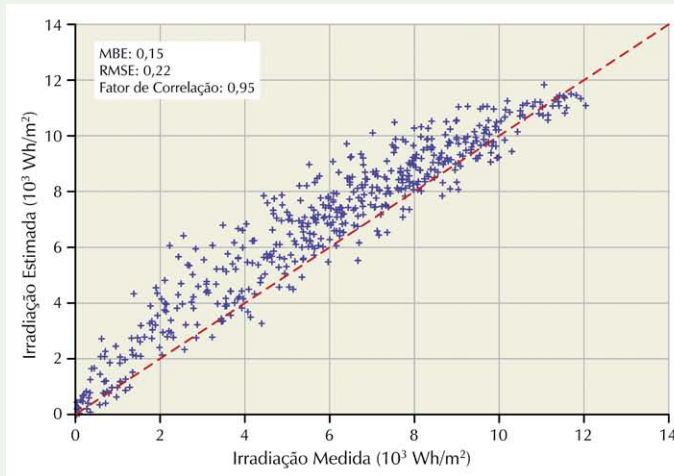


Figura 14. Gráfico de dispersão entre valores medidos e estimados da irradiação direta e o histograma dos desvios observados. Os pontos representam os dados das 3 estações SONDA apresentadas na Tabela 4.

Table 4 shows the deviations observed in each of the three validation sites. The mean bias error presented similar magnitude as other models in use by the scientific community [32]. The greater deviations were observed for Florianópolis and it would be related to its location in a coastal urban area. Figure 14 shows the scatter plot between measured and estimated values for direct normal irradiation and the histogram of observed deviations.

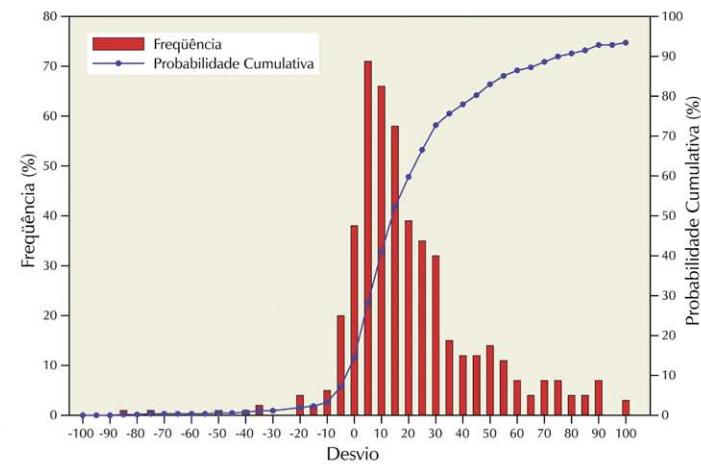


Figure 14. Scatter plot between measured and estimated values for direct irradiation and the histogram of observed deviations. The points represent data from the 3 SONDA stations presented in Table 4.

MAPAS SOLARIMÉTRICOS

Todos os mapas a seguir apresentam os valores médios das estimativas do total diário de irradiação solar fornecidas pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR para o período de julho de 1995 a dezembro de 2005 - uma década completa de dados. Os mapas estão na resolução espacial de 10km x 10km.

O mapa apresentado na página 34 mostra a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro. Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global - 6,5kWh/m² - ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí. Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano (aproximadamente 300mm/ano) e a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil ^[29]. A menor irradiação solar global - 4,25kWh/m² - ocorre no litoral norte de Santa Catarina, caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (4200-6700 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados ^[33].

A página 35 apresenta os mapas de médias sazonais da irradiação global diária. Os meses do ano foram classificados em 4 estações de modo que o período de dezembro a fevereiro refere-se ao Verão, de março a maio ao Outono, de junho a agosto ao Inverno e de setembro a novembro refere-se à Primavera.

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). A variação da incidência de radiação solar entre o Inverno e Verão é menor na região Norte do que nas regiões Sul e Sudeste. O decréscimo natural da incidência de radiação solar no topo da atmosfera que ocorre no Inverno em decorrência de fatores astronômicos associados ao

SOLARIMETRIC MAPS

All the following maps exhibit the average values of estimates for the daily total of solar irradiation provided by the BRASIL-SR radiative transfer model for the period between July 1995 and December 2005 - a full decade of data. The spatial resolution is 10km x 10km for all the maps.

The map shown in the page 34 exhibits the annual average of daily total of global solar irradiation that reaches the Brazilian territory. In spite of the different climate characteristics along the Brazilian territory, one can observe that the global irradiation is fairly uniform. The maximum solar irradiation value - 6,5kWh/m² - occurs in the northern part of Bahia state close to the border with the Piauí state. This area exhibits a semi-arid climate with low rainfall throughout the year (approximately 300mm/year) and the lowest annual mean cloud amount ^[29]. The lowest global solar irradiation - 4,25kWh/m² - occurs on the North shore of Santa Catarina where precipitation is well-distributed throughout the year. The annual mean of daily horizontal global solar irradiation in any region of the Brazil (4200-6700 kWh/m²) are much greater than those for the majority of the European countries such as Germany (900-1250 kWh/m²), France (900-1650kWh/m²) and Spain (1200-1850 kWh/m²) where projects to harness solar resources are greatly disseminated some of which with great government incentives ^[33].

Page 35 shows the maps for seasonal averages of daily global irradiation. The months of the year were arranged in 4 seasons so that the period from December to February applies to summer, March to May to fall, June to August to winter and September to November to spring.

The North region receives lower solar irradiation during the summer than the South region in spite of its closer location to the Equator. The opposite occurs during the winter months and the Amazon region receives larger daily global solar irradiation. This is due to climate characteristics of the Amazon region which features a larger cloud coverage and rainfall during the summer as a consequence of strong influence of the Inter-tropical Convergence Zone (ITCZ). The variation of the solar irradiation between winter and summer is smaller in the North region than in the South and Southeast. The inherent decrease of solar irradiation at the top of the atmosphere in the winter due to astronomic factors is counterbalanced in the Amazon region by a

sistema Sol-Terra 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. Em razão disso, o oeste do estado do Amazonas apresenta as menores irradiações solares da região Norte do Brasil 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 parcialmente 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. Também é na região Sul que 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. As características de clima temperado dessa região e a influência de sistemas frontais associados ao Anticiclone Polar Antártico contribuem para o aumento da nebulosidade na região, principalmente durante os meses de Inverno.

Assim como a região Norte, a região Central do Brasil recebe maior incidência de radiação solar durante as estações secas (Outono e Inverno), particularmente entre os meses de julho e setembro, quando a precipitação é baixa e o número de dias com céu claro é maior.

Os mapas da média do total diário de irradiação solar na faixa espectral fotossinteticamente ativa, denominada PAR, estão apresentados nas páginas 36 e 37. Embora essa radiação não tenha uma aplicação direta na área de energia, o conhecimento dessa radiação tem implicações na área de agronegócios e, portanto, no setor de biocombustíveis, além de ser importante para a determinação da produtividade primária. Os maiores níveis de irradiação PAR ocorrem durante a Primavera, sobre as regiões Nordeste e Centro-Oeste, e durante o Verão, na região Sul e Nordeste.

As páginas 38 e 39 mostram os mapas das médias anual e sazonais da irradiação solar diária incidente sobre um plano com inclinação igual a latitude do pixel 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. Os maiores níveis de irradiação 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.

smaller cloudiness associated to the ITCZ displacement towards the Northern hemisphere.

The ITCZ displacement combined with the incursion of the trade winds coming from the Atlantic Ocean is responsible for larger precipitation (about 1100mm) at the northwestern portion of the Amazon region even during the dry season between July and September. In reason of that, the West of the Amazon state exhibits the smallest year round solar irradiation of the North region of Brazil.

The trade winds incursion also explains the smaller solar irradiation on the shore and coastal region of the Brazilian Northeast. The maximum solar irradiation values are observed in western area of the Northeast region including a portion of Northern Minas Gerais, the Northeast of Goiás and the South of Tocantins. During the whole year, the influence of the Tropical High Pressure associated to the South Atlantic Tropical Anticyclone provides a stable condition of low nebulosity and high incidence of solar irradiation for this semi-arid region.

The global solar irradiation exhibits larger inter-seasonal variation in the Southern region. Also in the Southern region is where the lowest values of global solar irradiation in Brazil are found, notably on the northern coast of the Santa Catarina state, the shores of Paraná and São Paulo. The temperate climate characteristics of this region and the influence of the frontal systems associated with the Antarctic Polar Anticyclone contribute to enhance the nebulosity mainly in the winter months.

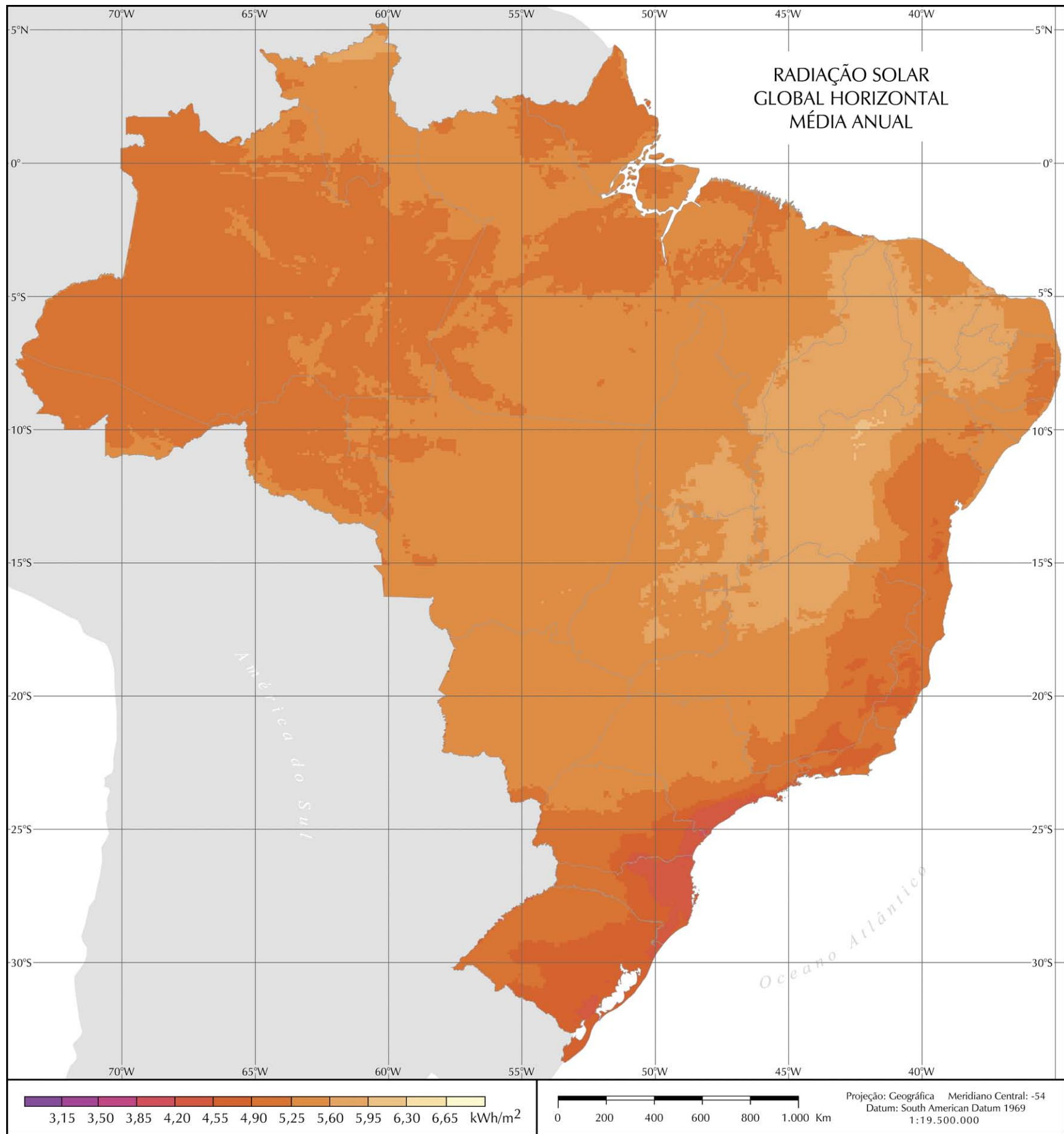
As in the Northern region, the Central region of Brazil gets a larger incidence of solar radiation during the dry seasons (fall and winter), mainly between the months of July and September when the precipitation is low and the number of clear sky days is greater.

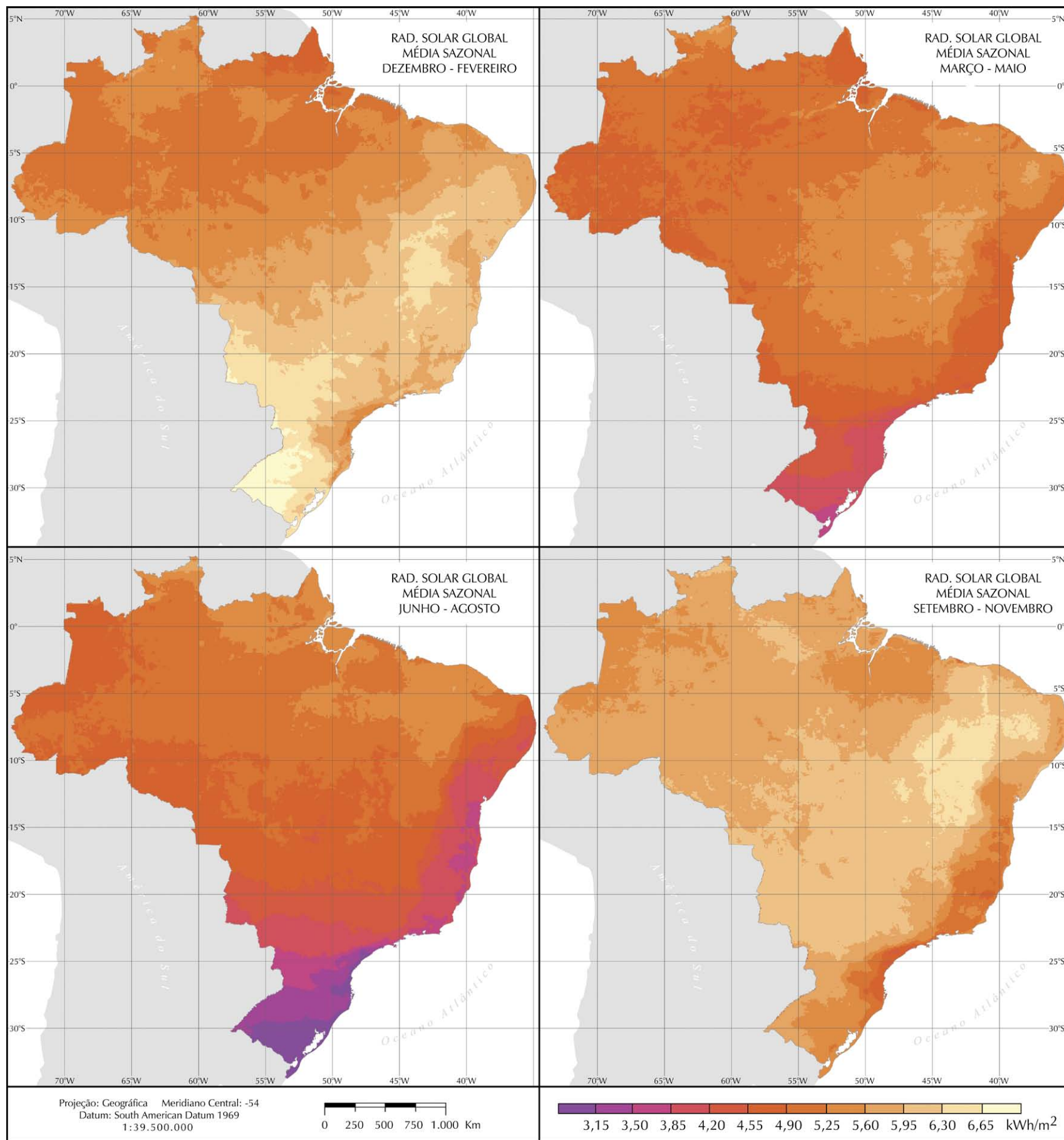
The maps of daily active photosynthetic spectral radiation, called PAR, are represented on pages 36 and 37. Though this radiation does not have any direct application to the energy area, the knowledge about PAR has many implications for agriculture and therefore for the biofuel sector. Besides that, it is also important to determine the primary biologic productivity. The largest values of mean PAR irradiation occur during the spring in Northeast and Midwest regions and during the summer in South and Northeast regions.

Pages 38 and 39 exhibit the maps of annual and seasonal averages of daily solar irradiation on a plane tilted in angle equal to the pixel's latitude. Disregarding the local topography, this configuration is the one that allows capturing the maximum solar energy. The solar irradiation on a tilted plane exhibits a strong influence of the surface albedo. The greatest levels of irradiation on the tilted plane occur in the range that goes from the Northeast to the Southwest during the spring and the smallest values in all Brazilian regions occur during the winter months.

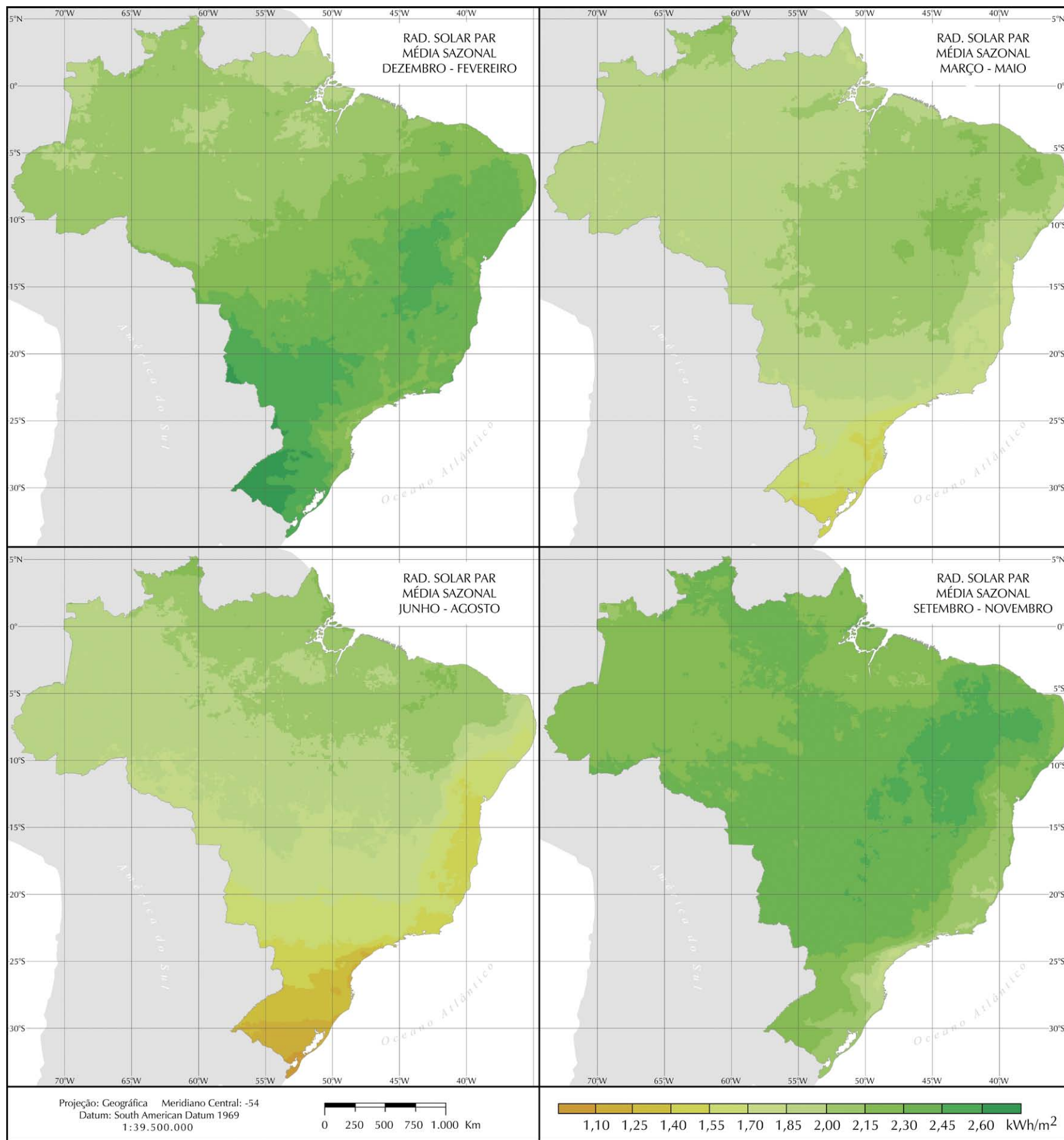
As páginas 40 e 41 apresentam, respectivamente, os mapas das médias anuais e sazonais para a componente difusa do total diário da irradiação solar. Na média anual, pode-se observar que a região Norte do país é a que apresenta maiores níveis de radiação difusa, principalmente sobre a foz do rio Amazonas. Isso se deve a maior nebulosidade na região em decorrência da ZCIT. Sazonalmente, os maiores níveis de radiação difusa ocorrem durante o Verão sobre toda a região Amazônica e os menores índices ocorrem durante o Inverno sobre as regiões Sudeste e Sul.

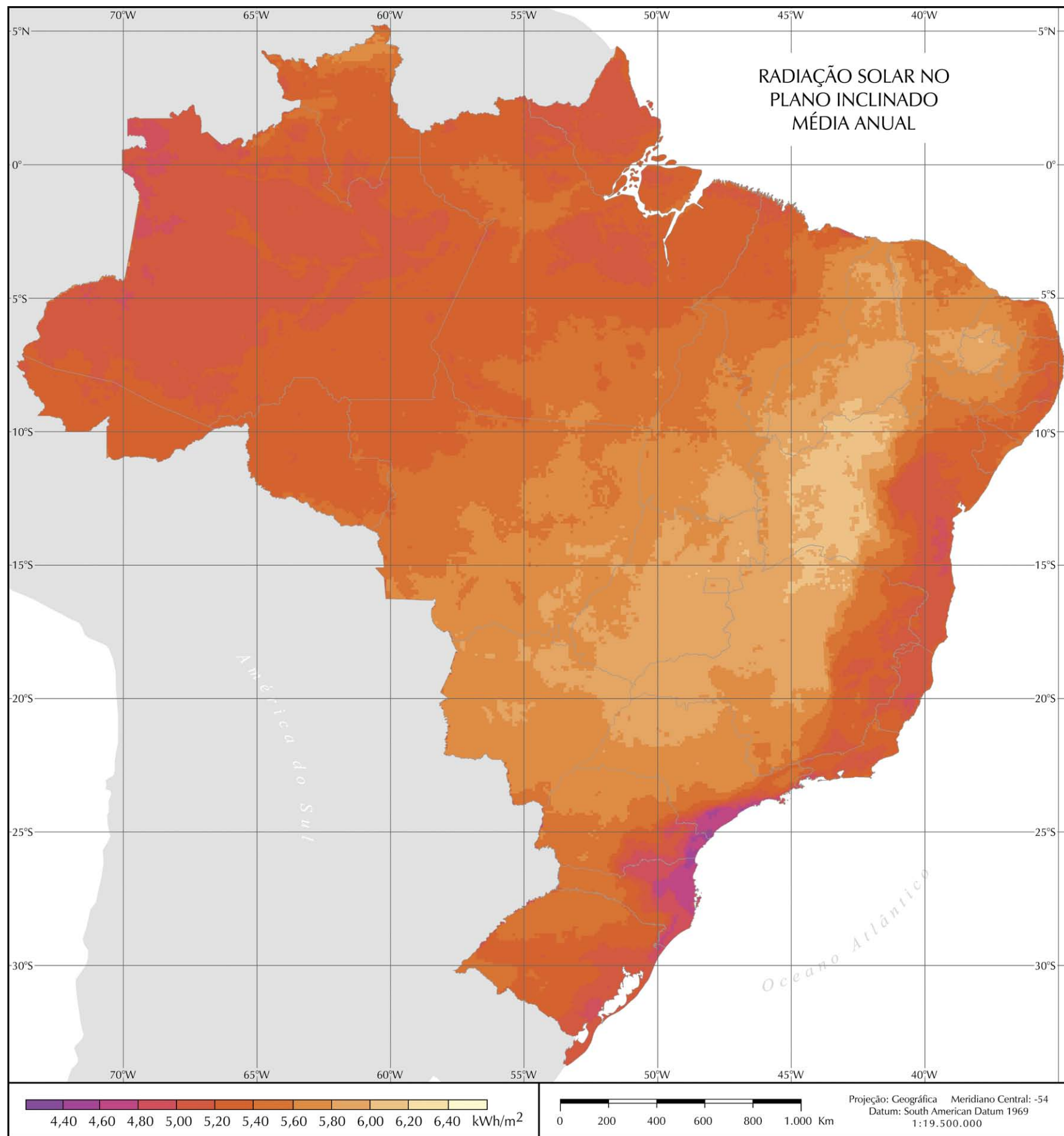
Pages 40 and 41 exhibit respectively the maps of annual and seasonal averages of the diffuse component of the daily total of solar irradiation. On the annual average one can observe that the Northern region receives greater diffuse irradiation mainly in the estuary of the Amazon River. This is due to the larger nebulosity in the region as a result of the ITCZ influence. Seasonally the greatest diffuse irradiation occurs during the summer throughout the Amazon region and the smallest values happen during the winter in the Southeast and South regions.

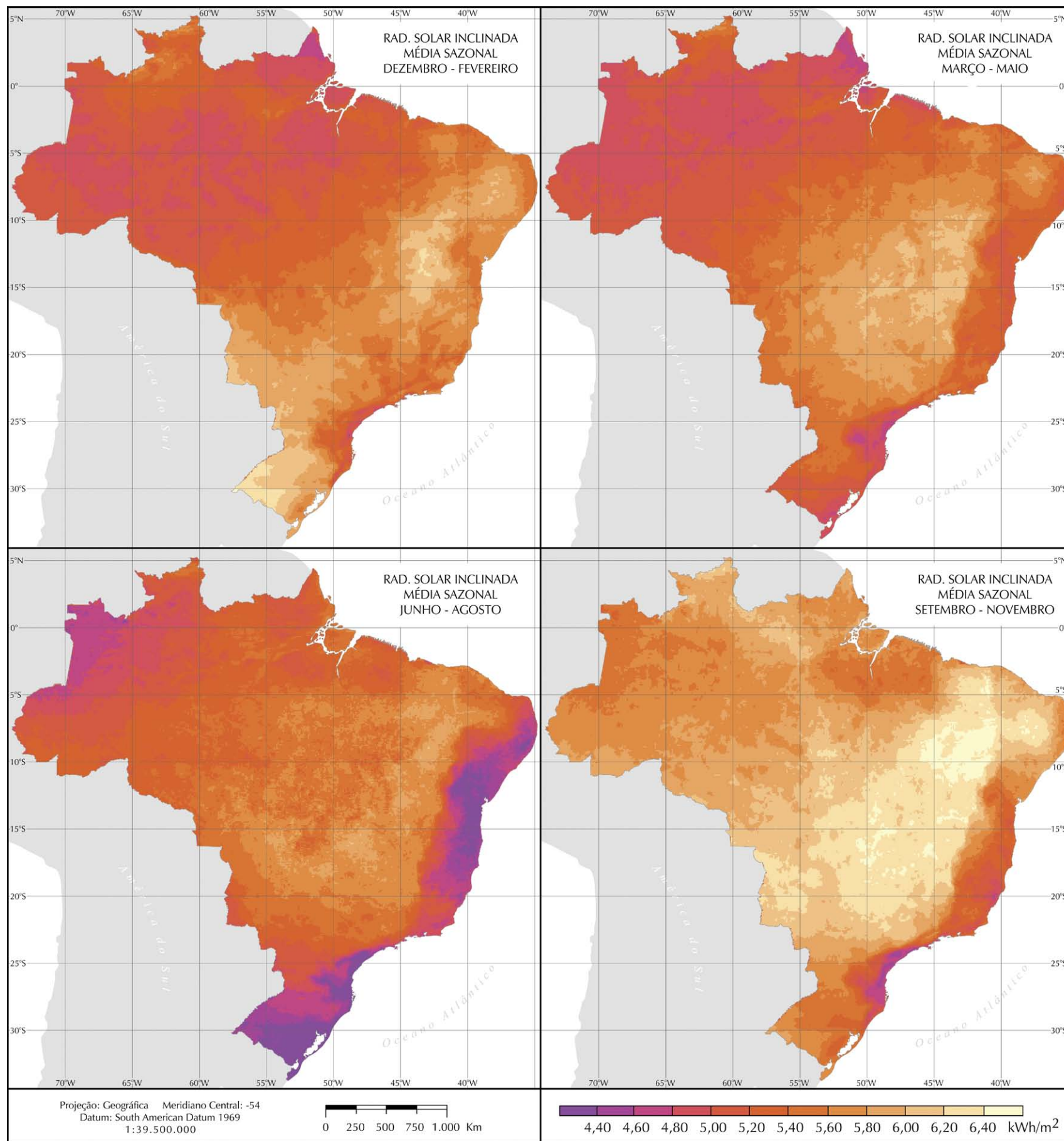


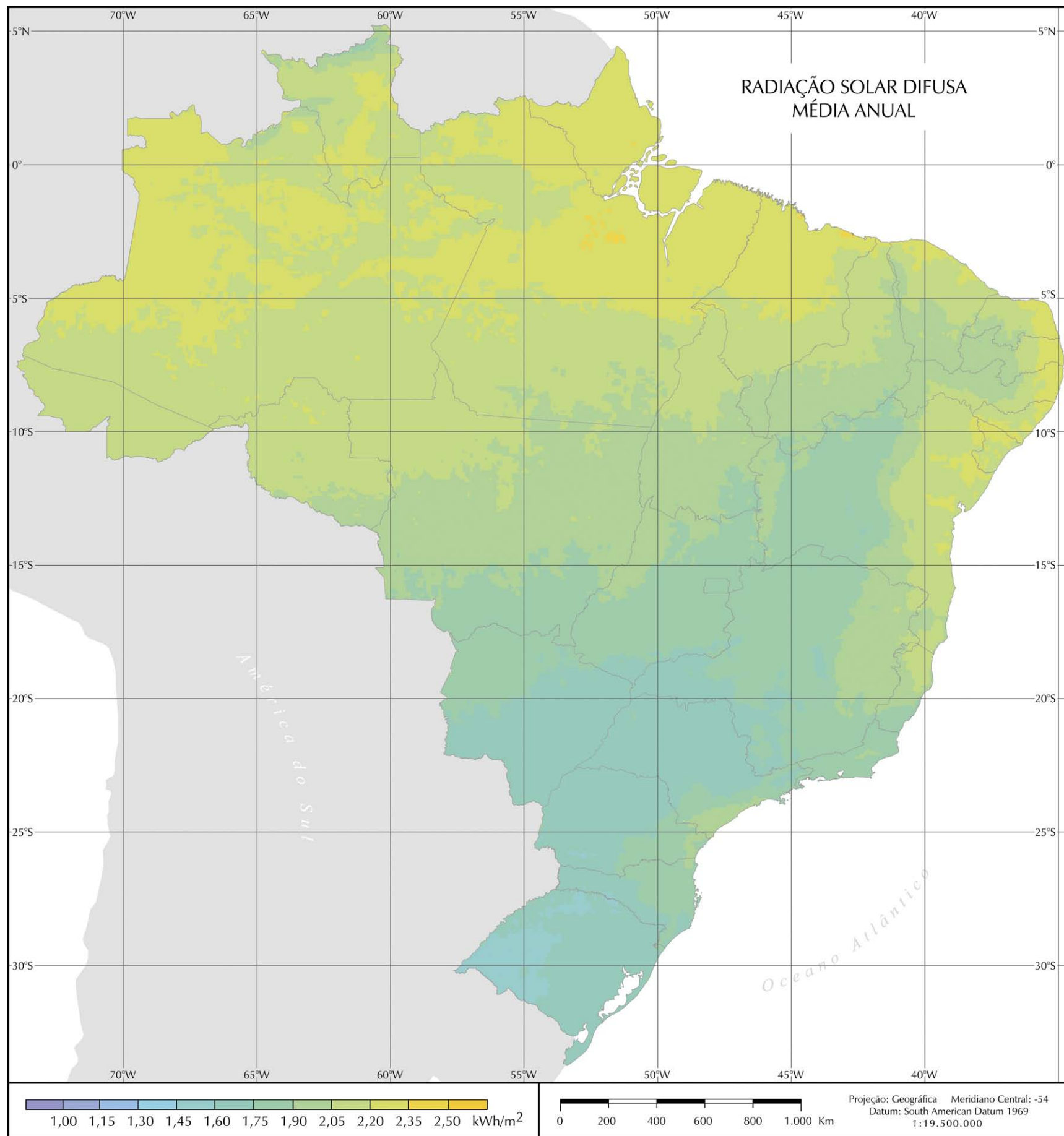


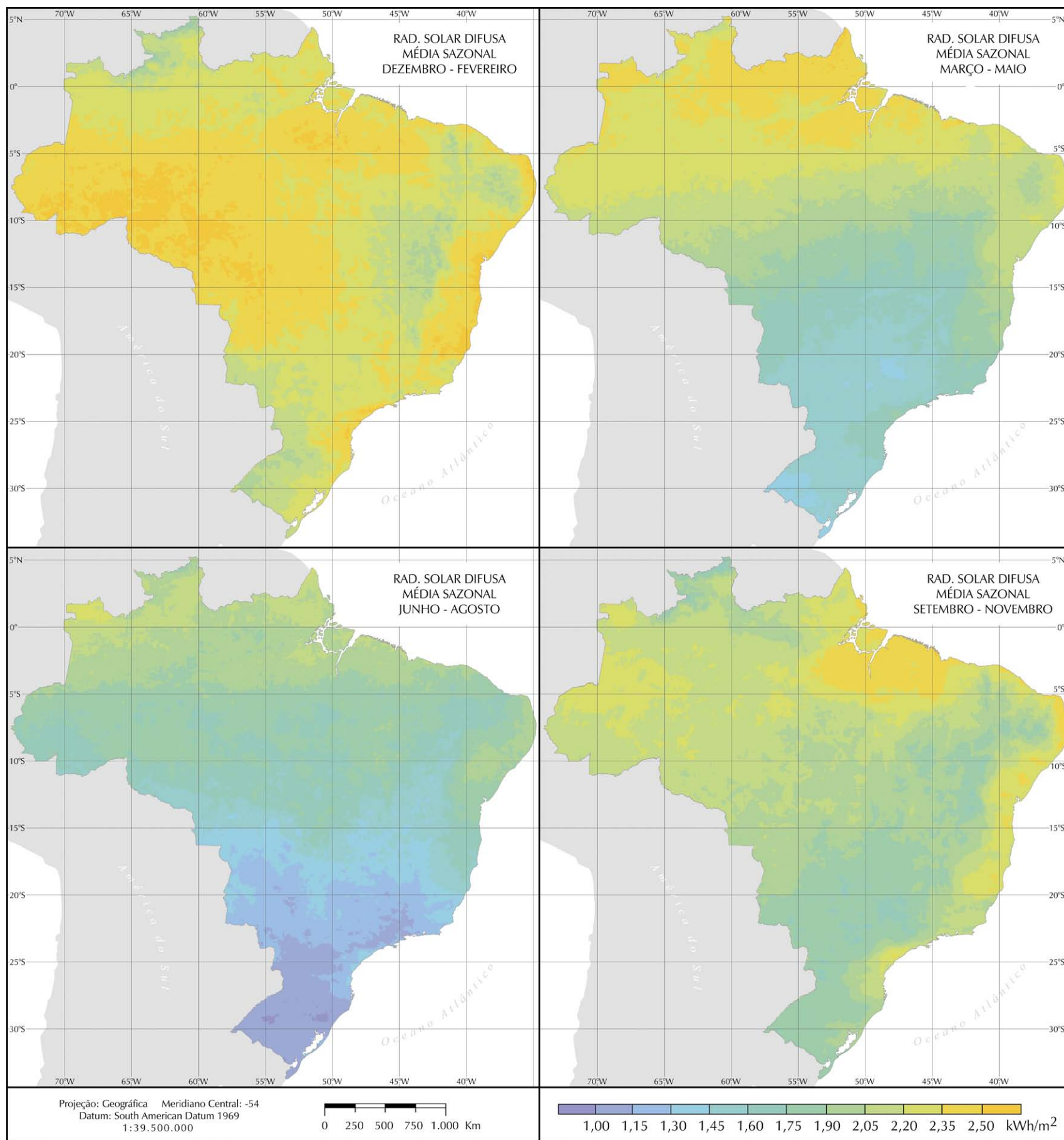












ESTUDO DE VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS

Este tópico tem por finalidade avaliar como o fluxo de radiação solar incidente na superfície varia em torno dos valores médios anuais e sazonais apresentados nos mapas anteriores. Dois estudos foram realizados e estão apresentados neste documento: um estudo da variabilidade média anual e um estudo da variabilidade média para cada estação do ano.

VARIABILIDADE ANUAL

A variabilidade anual, V_{anual} , aqui utilizada foi definida como a média da variabilidade inter-anual observada para cada dia do ano. 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 abaixo:

$$V_{anual} = \frac{V_{d,a}}{N_d} = \frac{\sum_{d=1}^{365} \left[\frac{DQM_d}{I_d} \right]}{N_d}$$

onde $DQM_d = \sqrt{\frac{\sum_{a=1995}^{2005} (I_{d,a} - I_d)^2}{N_a}}$

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 I_d é o valor médio de $I_{d,a}$ no período de julho de 1995 a dezembro de 2005.

O mapa apresentado na página 46 apresenta os valores obtidos para a variabilidade anual. Podemos interpretar a informação contida no mapa como a dispersão média apresentada pelos valores do total diário

VARIABILITY AND TRENDS STUDY

This topic is for the purpose of evaluating how the solar radiation flux varies around the annual and seasonal means exhibited on the previous maps. Two studies were done and they are presented here: the variability of global solar irradiation along the year and the variability of global solar irradiation in each season (winter, summer, spring and fall).

ANNUAL VARIABILITY

The annual variability, V_{anual} , used herein was defined as the average of the inter-annual variability observed for each day of the year. The inter-annual variability, $V_{d,a}$, for each day of the year was determined through the ratio between the mean quadratic deviation and the mean daily solar flux for each day of the year in the time period from 1995 to 2005 as presented below:

$$V_{anual} = \frac{V_{d,a}}{N_d} = \frac{\sum_{d=1}^{365} \left[\frac{DQM_d}{I_d} \right]}{N_d}$$

where $DQM_d = \sqrt{\frac{\sum_{a=1995}^{2005} (I_{d,a} - I_d)^2}{N_a}}$

is the mean quadratic deviation for day d of year, N_d is the number of days with valid data, N_a is the number of years with valid data, $I_{d,a}$ represents the daily global solar irradiation for day d in year a and I_d is the mean value for $I_{d,a}$ in the period of July 1995 to December 2005.

The map shown on page 46 exhibits the values obtained for the annual variability. The information contained on the map is the mean scattering exhibited by the values of the daily solar irradiation

em torno de sua média no período de 10,5 anos de dados considerados nesse estudo. Em outras palavras, uma variabilidade anual igual a 0,45 significa que o total diário de irradiação solar global apresentou uma dispersão média de 45% em torno do valor médio apresentado na página 34.

Analisando o mapa de variabilidade anual, pode-se notar que toda a região amazônica e a parte setentrional das regiões Nordeste e Centro-Oeste, incluindo o norte 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 apresentou 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 [29].

VARIABILIDADE SAZONAL

A variabilidade sazonal, $V_{sazonal}$, foi definida como a média da variabilidade intra-sazonal observada para cada ano do período de 1995 a 2005. 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 abaixo:

$$V_{sazonal} = \frac{\sum_{a=1995}^{2005} V_{saz_a}}{N_a}$$

$$V_{saz_a} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{d=n1}^{n2} (I_{d,a} - I_{saz})^2}{N_d}}}{I_{saz}}$$

onde

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

around its average within the whole period of 10.5 years of data of this study. In other words, an annual variability equal to 0.45 stands for a spreading of daily values of global solar irradiation up to 45% around its mean value presented in page 34.

Analyzing the annual variability map one may notice that the entire Amazon region and the western portion of the Northeast and Midwest regions including the North of the São Paulo state and the West of Minas Gerais show modest variability throughout the year - less than 25%. These regions show distinctive climate characteristics that reduces the solar flux variability throughout the year as for example the low nebulosity during the entire year in the semi-arid region and the high nebulosity during the summer in the Amazon region.

A great portion of the South region and the eastern area of the Southeast showed annual variability between 30 and 35% caused mainly by the penetration of polar air masses during the dry season of the year (May through October). The greatest variability values were observed in coastal region from Santa Catarina to São Paulo. This region coincides with the area of largest mean nebulosity of Brazil according to the climate data presented by INMET [29].

SEASONAL VARIABILITY

The seasonal variability, $V_{sazonal}$, was defined as the mean intra-seasonal variability observed for each year for the period from 1995 to 2005. The intra-seasonal variability for specific year, V_{saz_a} , was determined through the ratio between the mean quadratic deviation and the mean value of the daily solar flux for the specific season:

$$V_{sazonal} = \frac{\sum_{a=1995}^{2005} V_{saz_a}}{N_a}$$

$$V_{saz_a} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{d=n1}^{n2} (I_{d,a} - I_{saz})^2}{N_d}}}{I_{saz}}$$

where

N_d is the number of days with valid data, N_a is the number of years with valid data, $I_{d,a}$ represents the daily global solar irradiation for day d in year a and I_{saz} is the average value for global solar irradiation in

global para o dia d no ano a e I_{saz} é o valor médio da irradiação solar global na estação do ano. 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 global apresenta uma dispersão de 45% em torno do valor médio apresentado nos mapas sazonais da página 35.

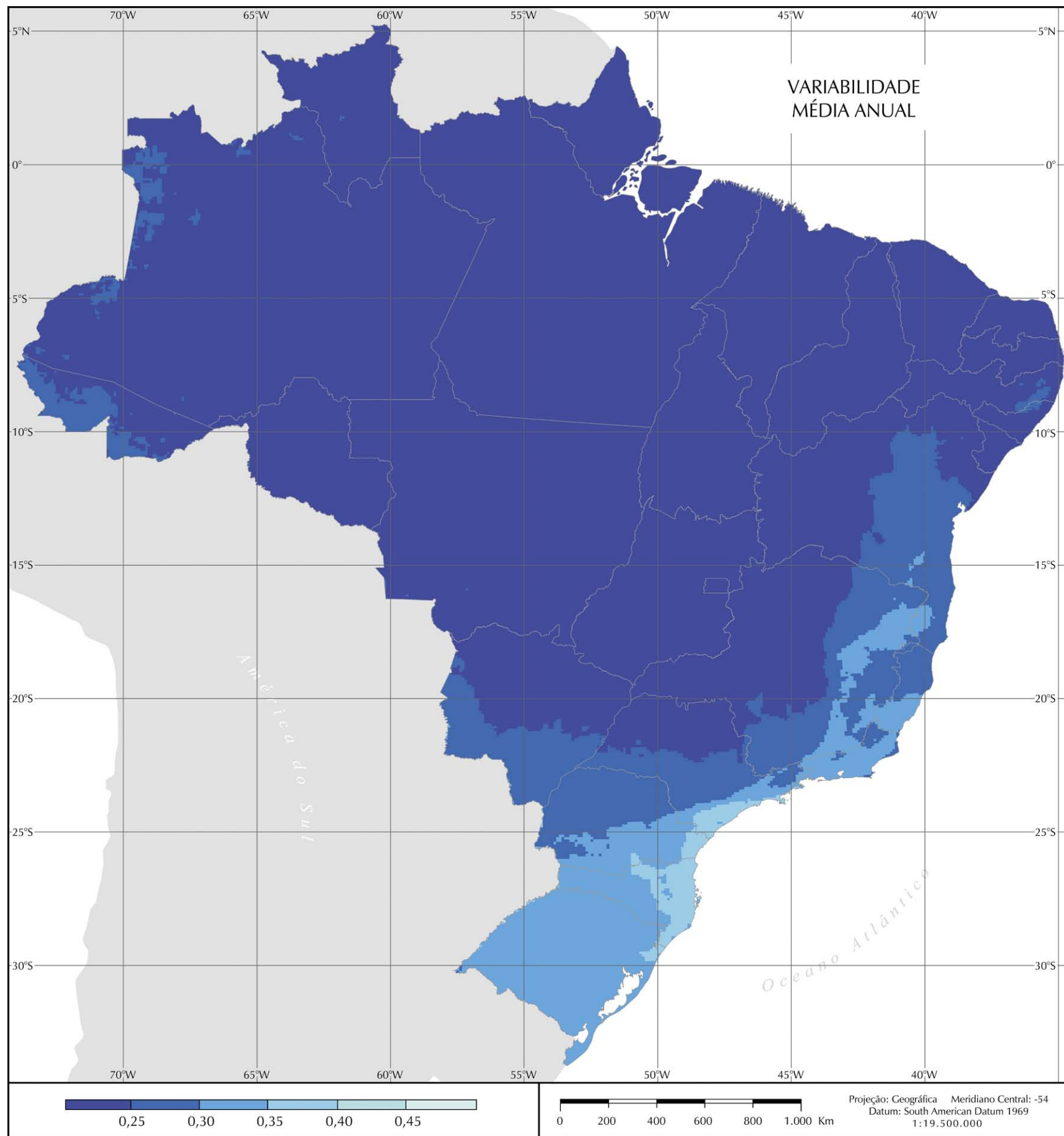
A página 47 apresenta os mapas de variabilidade sazonal para as quatro estações do ano. Verifica-se que as variabilidades sazonais apresentam o mesmo padrão verificado para a variabilidade anual. Toda a área centro-norte do país – a região amazônica, o cerrado, a região semi-árida do Nordeste, oeste 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.

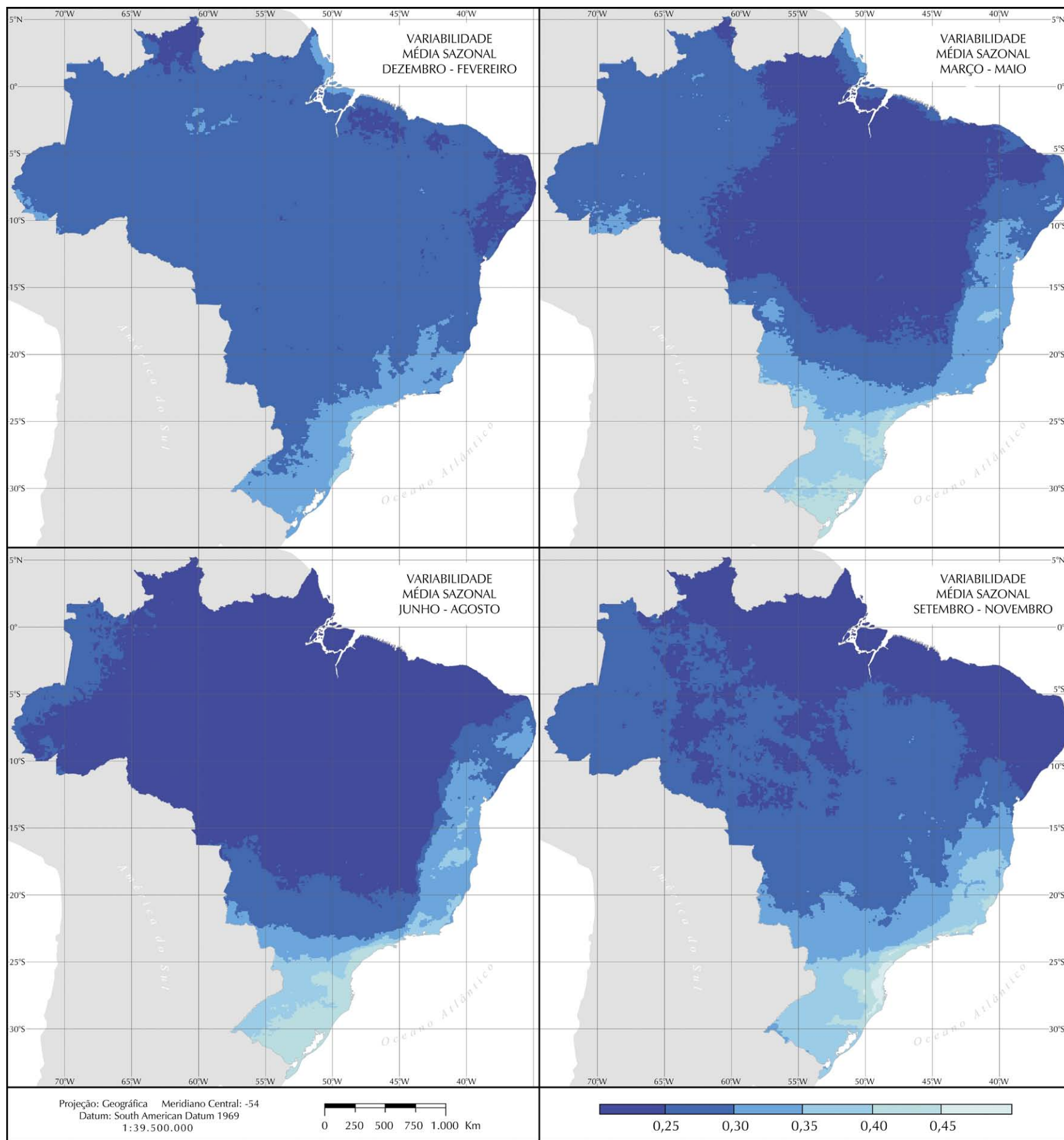
Vale mencionar que a área central do Brasil e a região amazônica apresentam menor variabilidade durante o Inverno (junho a agosto) e maior variabilidade durante o Verão. Esse comportamento reflete a variação da nebulosidade ao longo do ano. Durante o Inverno ocorrem poucas chuvas em toda essa região 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.

the season. For instance, a seasonal variability equal to 0.45 ($V_{sazonal}=0,45$) stands for a spreading of daily values of global solar irradiation up to 45% around its seasonal mean presented in seasonal maps (page 35).

Page 47 shows the seasonal variability maps for the four seasons of the year. It can be verified that the seasonal variability shows the same pattern observed for the annual variability. The entire mid-North area of the country - the Amazon region, the Cerrado, the semi-arid region of the Northeast, the West of Minas Gerais and the Northwest of São Paulo - show the smallest seasonal variability. On the other hand the coastal regions of the South and Southeast show the largest variability during all seasons of the year.

It is worth mentioning the central area of Brazil and the Amazon region show less variability during the winter (June through August) and larger variability during the summer. This behavior reflects the nebulosity variation all over the year. During the winter the rain precipitation is low in this entire region and the number of days with clear sky is greater, thereby reducing the variability of solar irradiation in the region. The presence of large nebulosity during the summer explains the larger variability of solar irradiation within this period.





TENDÊNCIAS REGIONAIS

A Figura 15 apresenta o potencial anual médio de energia solar para o período de 10 anos em que este estudo se baseia. A região Nordeste apresenta a maior disponibilidade energética, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste. As características climáticas da região Norte reduzem seu potencial solar médio a valores próximos da região Sul.

A Figura 16 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. Nessa figura, os quadrados centrais representam as médias no período, os quadrados maiores externos, as dispersões de um desvio-padrão (nível de confiança de 67%), e as barras verticais as dispersões de 2 desvios-padrão (nível de confiança de 95%). A região Nordeste é a que apresentou menor variabilidade inter-anual (entre 5,7 e 6,1 kWh/m²), seguida pela região Norte (entre 5,2 e 5,8 kWh/m²). No período de 10 anos analisado, a região Sul apresentou maior variabilidade inter-anual, com as médias anuais variando entre 4,6 e 6,0 kWh/m².

As Figuras 17(a) a 17(d) mostram as variabilidades inter-anuais das médias sazonais em cada região. A região Sul apresenta a maior variabilidade entre as estações do ano, isto é, o fluxo de radiação solar média no Verão é cerca de 65% maior que o fluxo no Inverno. A região Norte é a que apresenta menor variabilidade entre as estações do ano, sendo que o valor mínimo da irradiação solar ocorre durante o Outono (por volta de 5,1 kWh/m²) e o valor máximo acontece durante a Primavera (aproximadamente 5,9 kWh/m²).

As estações Outono e Inverno apresentam as maiores variabilidades inter-anuais das médias sazonais em todas as regiões do Brasil (maior dispersão medido pela distância entre as barras nas figuras). A entrada de sistemas frontais pode ser apontada com a principal razão para o aumento das variabilidades nas regiões Sul e Sudeste. O aumento da nebulosidade decorrente da penetração desses sistemas provoca uma redução acentuada da irradiação solar na superfície durante alguns dias consecutivos.

A explicação para o aumento das variabilidades observadas nos períodos de Outono e Inverno nas regiões Norte e Centro-Oeste não é clara, uma vez que é nesse período do ano que se observa a maior quantidade de dias de céu claro (menor nebulosidade) nessas regiões.

REGIONAL TRENDS

Figure 15 shows the annual average potential of solar energy for the 10 years period on which this study is based. The Northeast region shows the largest energy resource followed by the Midwest and Southeast regions. As mentioned before, the climate characteristics of the North region reduce its mean solar irradiation to values close to those observed for the South region.

Figure 16 allows a comparison of the inter-annual variability of the annual averages of daily global solar irradiation for each of the Brazilian regions. In this figure the central squares represent the averages in the 10 year period, the outer larger squares represents the range for confidence level equal to 67% (one standard deviation) and the vertical bars shows the limits for confidence level of 95%. The Northeast region presented the smallest inter-annual variability (between 5,7 and 6,1 kWh/m²) followed by the North region (entre 5,2 e 5,8 kWh/m²). During the 10-year period analyzed, the South region showed larger inter-annual variability with annual mean solar flux varying between 4,6 e 5,6 kWh/m².

Figures 17(a) through 17(d) show the inter-annual variability of the seasonal averages for each region. The South region showed the largest seasonal variability, i. e., the average solar radiation flux in the summer is about 65% larger than it is in the

winter. The North region presented the lowest seasonal variability with the minimum value in the fall season (around 5,1 kWh/m²) and the maximum values during the spring (approximately 5,9 kWh/m²).

The fall and winter seasons showed the largest inter-annual variability in all regions of Brazil (larger spreading measured by the distance between bars on the figure). The frontal systems are supposed to be the main reason for this larger variability in the South and Southeastern regions. The increase on nebulosity resulting from the incursion of frontal systems causes a noticeable reduction of solar irradiation during several consecutive days.

The reason for the variability increase observed during the fall and winter seasons in the North and Midwest regions is not clear. A larger

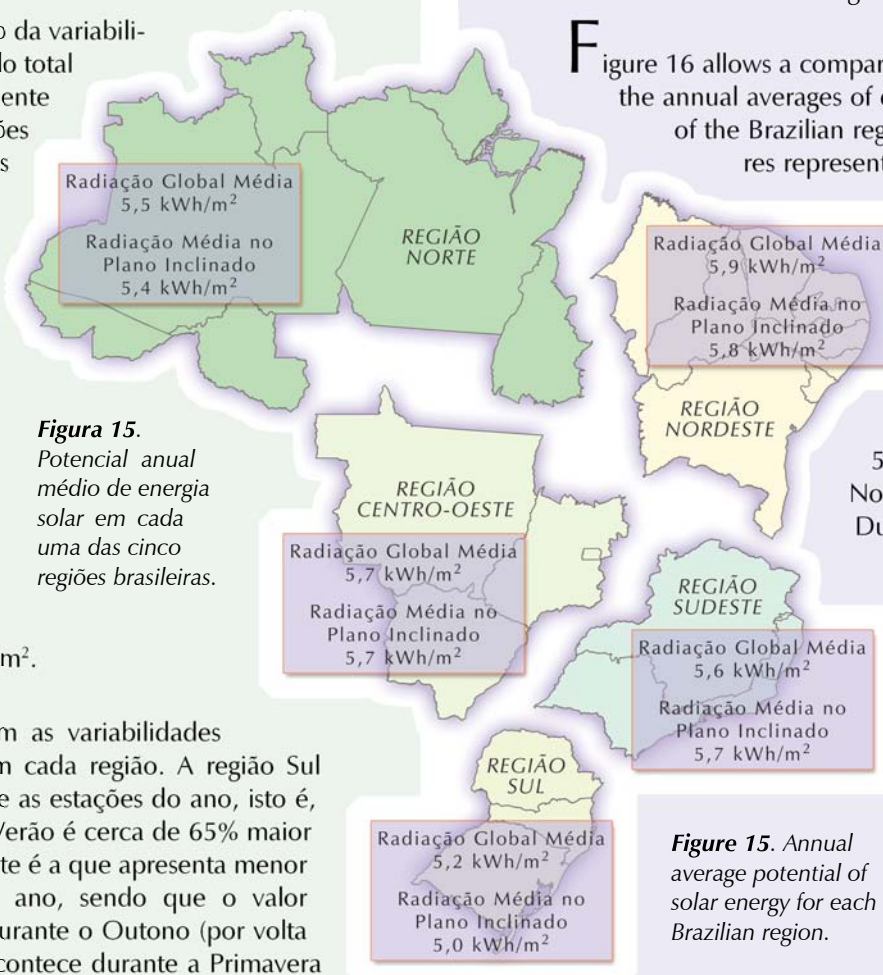


Figura 15. Potencial anual médio de energia solar em cada uma das cinco regiões brasileiras.

Figure 15. Annual average potential of solar energy for each Brazilian region.

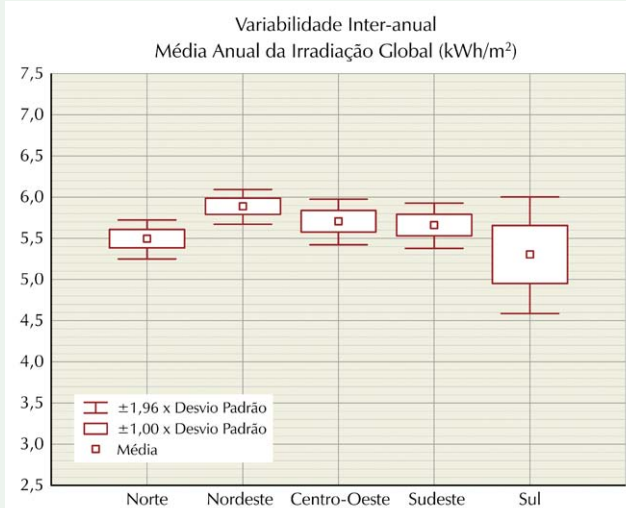


Figura 16. Variabilidade dos valores médios da irradiação solar ao longo do ano para cada uma das regiões geográficas do Brasil.

Figure 16. Variability of the annual mean values of solar irradiation for each of the geographical regions of Brazil.

Uma hipótese pode ser o aumento da concentração de aerossóis e gases emitidos pela queima de biomassa em eventos de queimada típicos dessa época do ano nessas regiões.

Um estudo de regressão linear aplicado aos valores médios anuais determinados para cada uma das regiões mostra uma possível tendência de redução do fluxo de radiação solar incidente em quatro das cinco regiões brasileiras. A Figura 18 apresenta as séries temporais da média anual de irradiação solar global juntamente com a linha de regressão linear e as curvas-limite 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 da ordem de -0.7. Apenas a região Sul não apresentou tendência definida.

quantity of clear sky days can be observed (less nebulosity) in these regions during dry season (fall and winter). One hypothesis may be the increase of aerosol particle number concentrations emitted to the atmosphere by the burning of biomass typical during this time of the year in these regions.

A study of the linear regression applied to the annual mean values depicts a small but noticeable trend of reducing the solar radiation incidence in four of the five Brazilian regions. Figure 18 shows the temporal series of the annual mean values of daily global solar irradiation together with the linear regression and the 95% confidence range. The result of this trend is more statistically significant for the North and Southeast regions which showed correlation coefficients around -0.7. Only the South region did not show statistically significant evidences for any tendency.

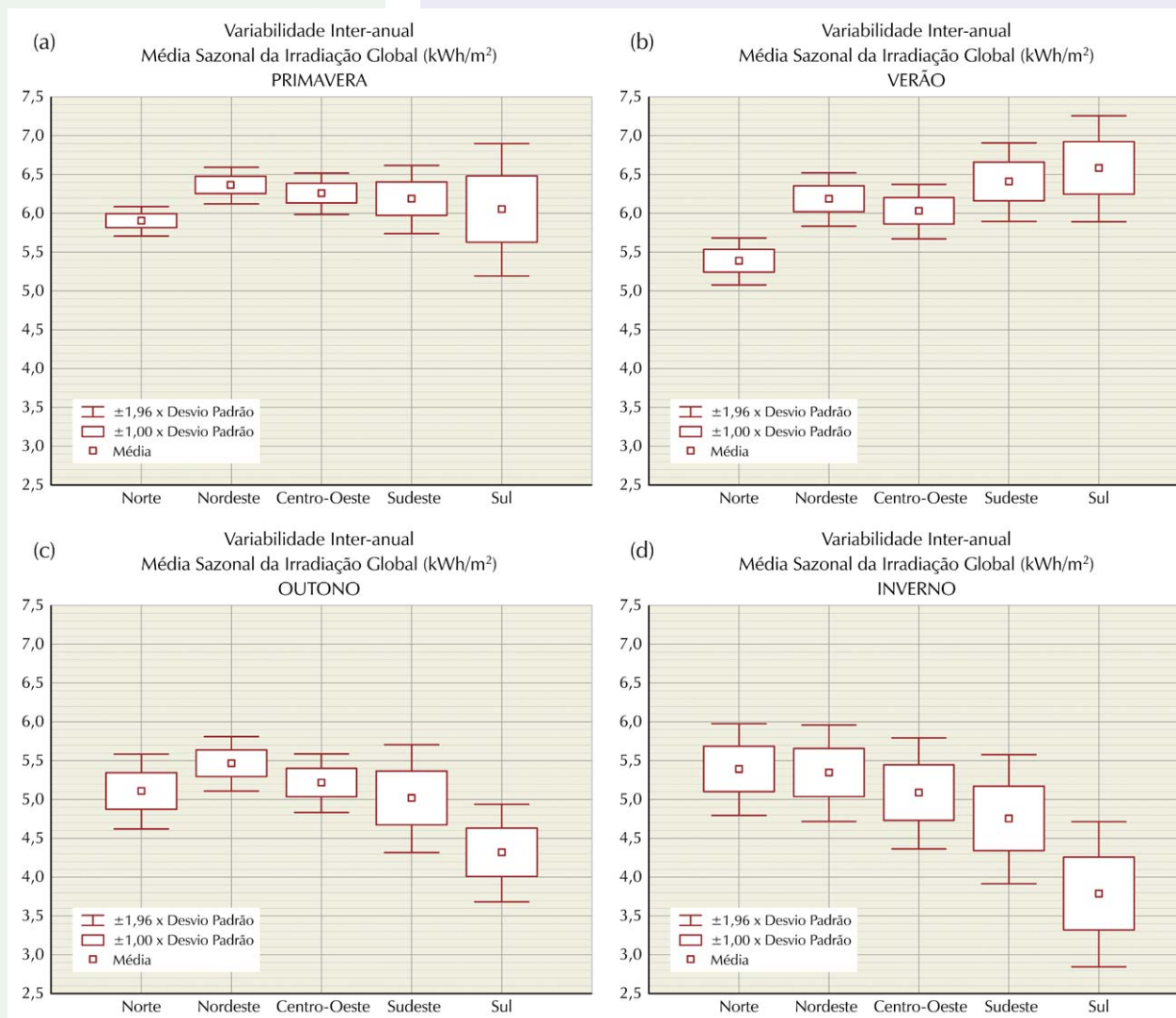


Figura 17. Variabilidade dos valores médios sazonais da irradiação solar para as cinco regiões geográficas do Brasil.

Figure 17. Variability of the seasonal mean values of solar irradiation for each of the geographical regions of Brazil.

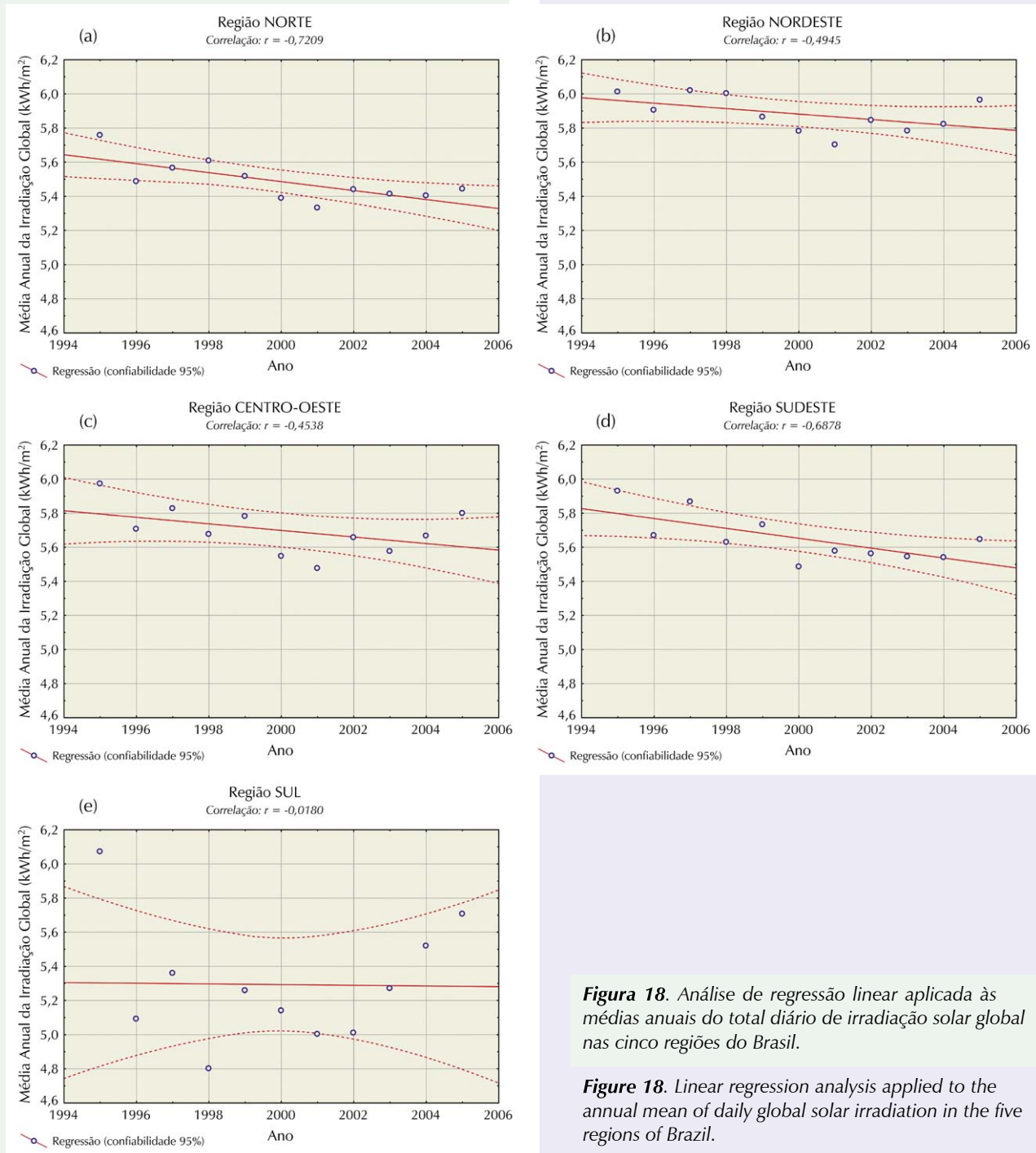


Figura 18. Análise de regressão linear aplicada às médias anuais do total diário de irradiação solar global nas cinco regiões do Brasil.

Figure 18. Linear regression analysis applied to the annual mean of daily global solar irradiation in the five regions of Brazil.

CENÁRIOS DE APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR

Com o intuito de demonstrar as aplicações potenciais e destacar as possibilidades econômicas de exploração do recurso energético solar, são apresentados, a seguir, alguns cenários energéticos estabelecidos a partir da base de dados sócio-econômicos coletados durante a execução do Projeto SWERA e das estimativas de irradiação solar fornecidas por este Atlas. Os cenários aqui apresentados são bastante simplificados e tem como objetivo apenas ilustrar possíveis aplicações dos dados apresentados nesta publicação.

AQUECIMENTO SOLAR

Estima-se que o aquecimento de água é responsável por 25% do total de energia elétrica consumida nas residências brasileiras o que representa um consumo da ordem de 20 bilhões de kWh. Tal demanda de energia elétrica ocorre principalmente no fim da tarde ocasionando um pico que poderia ser reduzido em grande parte com a exploração da energia solar, trazendo ainda vantagens econômicas e ambientais. O chuveiro elétrico é o equipamento mais empregado para esta tarefa, apresenta um custo reduzido para instalação (abaixo de US\$15) e pode consumir uma potência de até 6kWh.

Segundo informações da Sociedade Brasileira de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação e Aquecimento ^[34], existem aproximadamente 250.000 aquecedores solares instalados no Brasil, o que representa apenas 0,6% do total de residências brasileiras. O Brasil possui um número ainda pequeno de sistemas solares instalados para aquecimento de água quando comparado com países como China, Israel, Turquia, Grécia, Alemanha, etc., e é, portanto, um grande mercado a ser explorado comercialmente.

O investimento inicial é a principal barreira para a adoção em larga escala de sistemas solares para aquecimento de água no Brasil. Um sistema compacto dimensionado para famílias de baixa renda apresenta um custo superior a US\$450, ou seja, cerca de 30 vezes superior ao custo de um chuveiro elétrico. No entanto, o custo pago pela empresa de distribuição de energia elétrica para atender a demanda de energia durante o pico causado pelo uso de chuveiros

SOLAR ENERGY APPLICATION SCENARIOS

This topic aims at demonstrating the potential application and highlighting the economic possibilities for exploring the solar energy resource. Some energy scenarios established from the socio-economic database collected during the SWERA project and the solar irradiation estimates supplied by this Atlas were presented and discussed. The scenarios presented are greatly simplified and have the sole purpose to illustrate some possible applications for the data presented in this publication.

SOLAR HEATING OF WATER

It is being estimated that water heating is responsible for 25% of the total electric power consumed in the Brazilian households (electricity consumption around 20 billion kWh). Such demand for electric energy occurs primarily in the late afternoon causing a demand peak that could be greatly reduced with the exploration of solar energy with economic and environmental advantages. The electric showerhead is the equipment mostly used for water heating as it has a very low cost for installation (below US\$15) but may consume up to 6kWh

According to information from the Brazilian Society for Refrigeration, Air Conditioning, Ventilation and Heating ^[34], there are approximately 250,000 solar heaters installed in Brazil which represents only 0.6% of the total of Brazilian homes. Brazil still has a small number of solar systems installed when compared to countries like China, Israel, Turkey, Greece, Germany, etc., and it is therefore a great market to be commercially explored.

The initial investment is the main barrier to adopt solar systems on a great scale to heat domestic water in Brazil. A compact system sized for a low-income family represents a cost above US\$450, about 30 times more than the cost of an electric shower. However, the cost paid by the electric distribution company to meet the demand during the peak is substantially greater so the incentive policies towards a large scale adoption of solar heating systems could be undertaken by the companies responsible for electric power distribution. Law No. 10.295

elétricos é consideravelmente maior, de forma que políticas de incentivo para adoção em larga escala de sistemas solares de aquecimento poderiam ser praticadas pelas empresas responsáveis pela distribuição de eletricidade. A lei no. 10.295 estabelece uma política nacional para a racionalização e conservação da energia que visa incentivar a adoção de aquecimento solar.

A metodologia empregada para o desenvolvimento do cenário apresentado a seguir utilizou a análise "F-Chart" [35] considerando a adoção de um sistema

compacto de baixo custo voltado para substituição do chuveiro elétrico em residências da população de baixa renda. A fração solar F é definida como a razão entre a economia de eletricidade e a energia total necessária para

o aquecimento da água sem o uso de aquecedor solar. O sistema adotado para o cenário apresenta uma área útil de $1,6\text{m}^2$ com volume diário de 120 litros e preço total de US\$500. A curva de eficiência atende o padrão classificado como Tipo A pelo INMETRO (Instituto Brasileiro de Metrologia). O ciclo de vida considerado na análise tem a duração de 20 anos. Considerou-se o custo da eletricidade em $0,12\text{US}\$/\text{kWh}$, a inflação do combustível em 5%aa e uma taxa de juros

Tabela 5. Resultados apresentados para o cenário de adoção de um sistema solar de baixo custo para aquecimento de água em residências da população de baixa renda. $F \times L$ é a economia de energia conseguida com a adoção do sistema.

$F \times L$ (kWh)	População			Núm. residências (4 pessoas)			Área (km ²)
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural	
1.911,1 – 2.309,6	14.447.343	9.079.651	5.358.072	3.611.836	2.269.913	1.339.518	2.480.154,0
2.309,6 – 2.376,8	48.519.937	36.776.206	11.709.431	12.129.984	9.194.051	2.927.358	2.294.565,5
2.376,8 – 2.473,3	24.933.479	20.805.483	4.082.695	6.233.370	5.201.371	1.020.674	1.538.850,7
2.473,3 – 2.584,0	51.738.039	45.443.008	6.257.941	12.934.510	11.360.752	1.564.485	1.171.379,9
2.584,0 – 3.039,1	47.759.416	42.065.036	5.664.617	11.939.854	10.516.259	1.416.154	1.029.926,6

establishes a Brazilian policy for the rationalization and conservation of energy and intends to encourage the adoption of solar heating.

The methodology employed for the development of the solar water heating scenario have used the "F-Chart" [35] analysis considering the adoption of a compact low cost system designed to replace the electric shower in households of low income family. The solar fraction F is defined as the ratio between the electric power saving and the total energy required to heat the water without the use of solar heat. The

Table 5. Results shown for the solar water heating scenario that adopts a low cost system for low-income households. $F \times L$ is the energy saving achieved with the adoption of a solar heating system.

system adopted for the scenario shows a net area of 1.6m^2 with a volume of 120 liters and a total cost of US\$500. The efficiency curve meets the standard classified as Type A by the INMETRO (Brazilian Institute for Metrology). The life cycle

considered in the analysis was 20 years. It was supposed that the electricity price in $0.12\text{US}\$/\text{kWh}$, the fuel inflation at 5% per year and the interest rate equal to 10% per annum. The power consumption was estimated on basis of a water temperature of 40°C at the shower and the seasonal mean of air temperature for the location under consideration. Table 5 shows the data obtained with the analysis performed and the maps shown in Figure 19 exhibit (a) the total

Figura 19. (a) Energia total necessária para aquecimento e (b) tempo de retorno do investimento (PB).

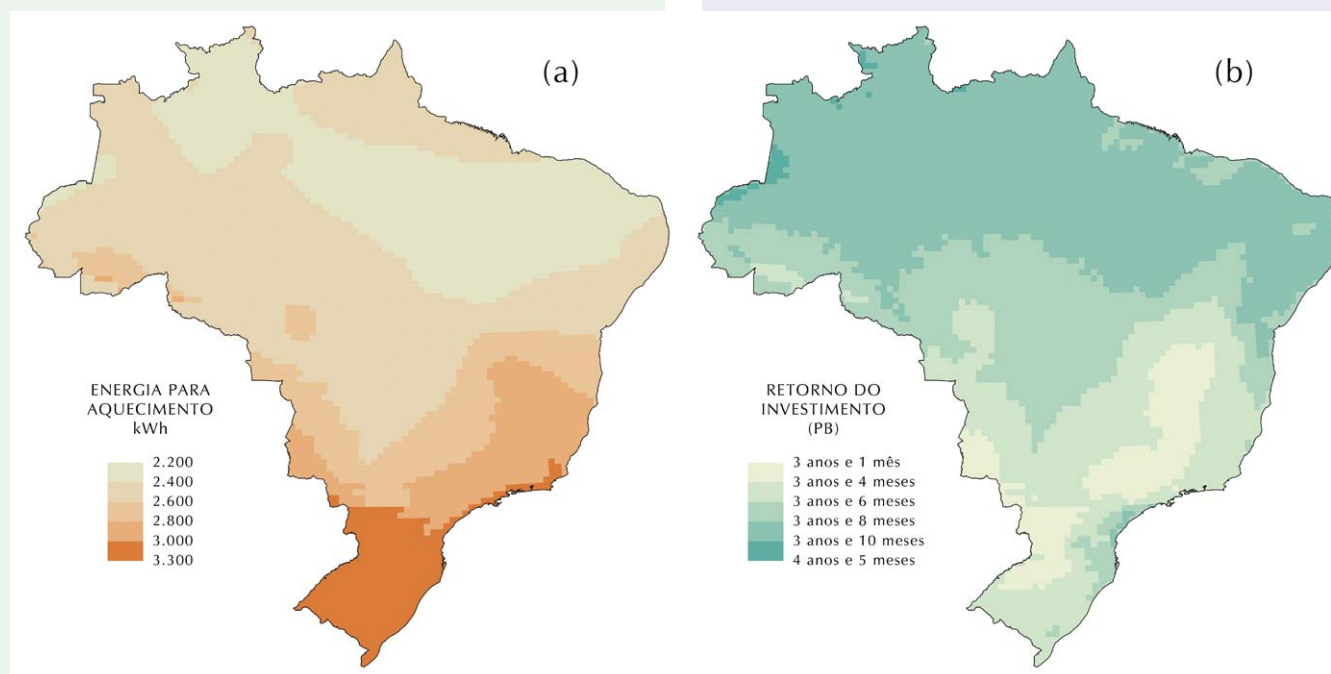


Figure 19. (a) Total required energy for water heating and (b) payback time (PB).

de 10%aa. O consumo de energia foi estimado assumindo a temperatura da água em 40° C no chuveiro e a temperatura ambiente climatológica para o local em estudo em função do estação do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera). A Tabela 5 apresenta as informações obtidas com a análise realizada e os mapas apresentados na Figura 19 mostram (a) a energia total necessária para aquecimento e (b) o tempo de retorno do investimento (PB). O tempo de retorno do investimento é menor para regiões com maior demanda de energia quando comparadas a regiões com maior disponibilidade de energia solar, o que indica que nessas regiões seriam obtidos melhores resultados com sistemas menores (menor custo). Observe-se que um sistema com custo ainda menor que o aqui utilizado como exemplo traria melhores retornos. A Tabela 6 apresenta os resultados para o estudo de caso realizado para a cidade de Brasília onde a população atingida representa o número total de habitantes (urbana + rural) com renda inferior a US\$1000/mês.

FOTOVOLTAICO

Estão apresentadas neste tópico duas grandes aplicações da tecnologia PV no Brasil que foram identificadas e mostram a existência de potencial para grandes volumes. O conhecimento detalhado da distribuição do potencial de energia solar é crítico para o desenvolvimento dos cenários e em levantamentos de viabilidade econômica para ambas as aplicações.

SISTEMAS HÍBRIDOS DIESEL-PV EM PEQUENAS REDES NA REGIÃO AMAZÔNICA

Atualmente, é largamente difundido que a descentralização da distribuição de energia e do aproveitamento de fontes de energia é a única forma de entregar eletricidade para bilhões de pessoas que ainda não tem acesso a essa comodidade essencial para a qualidade de vida. Não há capital disponível e o custo efetivo inviabiliza a distribuição na forma tradicional. As grandes distâncias e a demanda relativamente baixa tornam os custos de transmissão e distribuição proibitivos.

A maior parte da região Amazônica não está conectada ao sistema interligado de distribuição de eletricidade do Brasil, como pode ser observado na Figura 20. Atualmente há centenas de pequenas redes operadas por produtores independentes ou fornecedoras de energia estatais, cobrindo a maior parte da demanda dessa região que corresponde a uma pequena parcela do consumo total de energia do país. As pequenas redes cobrem cerca de 45% da área, mas fornecem energia a somente 3% da população [36]. A maioria dos locais onde elas operam não são facilmente acessíveis, aumentando os custos e

required energy for heat and (b) the time for a return on the investment (PB). The payback is smaller for regions with greater energy demand when compared to regions with greater solar energy availability. That suggests better results could be obtained in these regions with smaller systems (smaller cost). Notice that a system with a cost still lesser than the one given here as an example would bring better returns. Table 6 exhibits the results for the case study done for the city of Brasilia where inhabitants represent the total number of people (urban + rural) with and income below US\$1,000/month.

Tabela 6. Estudo de Caso para a cidade de Brasília a partir dos resultados apresentados para o cenário de adoção de um sistema solar de baixo custo para aquecimento de água em residências da população de baixa renda. O número de habitantes é formado pela população residente em Brasília (urbana + rural) com renda inferior a US\$1000 ao mês.

Table 6. A case study for Brasilia - the results obtained for the scenario that adopts a low cost solar water heating system in low-income households. The number of inhabitants represents the population living in Brasilia (urban + rural area) with an income below US\$1,000/month.

Brasília	Sistema Compacto				
	F x L (kWh)	Habitantes	Economia (kW)	LCS (US\$)	PB (anos)
Renda inferior a 1000US\$/mês	1.004.826,7	322.303	323,9	2.993,1	2,9

PHOTOVOLTAIC

This topic presents two major applications for PV in Brazil, where there is a potential for large capacity for investments, and for which the accurate knowledge of the solar resource distribution is critical.

HYBRID DIESEL-PV SYSTEMS IN MINI-GRIDS IN THE AMAZON REGION

In most of the large countries of the developing world, it is widely acknowledged that distributed resources are the only way of providing electricity to the billions of people that presently do not have access to it. There is no capital available and it is not cost-effective to deliver power in the traditional way. Long distances and relatively small energy demands make transmission and distribution costs prohibitive.

The most of Amazon region is not linked to the Brazilian interconnected system of electricity distribution as shown in the Figure 20. There are currently hundreds of mini-grids operated by independent power producers (IPPs) or local state utilities in the Amazon, that cover the main share of this energy demand, which is however only a small proportion of the country's total energy consumption. Mini-grids extend over some 45% of the area, but supply energy to only 3% of the population [36]. Most of the sites where they operate are not easily accessible, increasing cost and decreasing reliability of supply. The operators of these systems, however, all make use of a subsidy that

diminuindo a confiabilidade desses recursos. Os operadores desses sistemas, no entanto, fazem uso de um subsídio que paga 100% do combustível, conquanto que eles operem abaixo do limite de consumo específico de 0,34 l/kWh. O período de duração desse subsídio governamental foi aumentado para mais 20 anos. As prestadoras de serviço são autorizadas a cobrar uma taxa maior de todos os consumidores urbanos e residenciais do sistema elétrico interligado brasileiro, de maneira a adquirir fundos para subsidiar os consumidores desses locais isolados. Esse sistema de sobre-taxa, e os fundos arrecadados, são dirigidos diretamente a chamada Conta de Consumo de Combustíveis dos Sistemas Isolados, que subsidia o diesel das centrais térmicas das pequenas redes isoladas.

O potencial de uso de PV, no entanto, é imenso, e pode ser estimado de dezenas a centenas de MWp somente na região amazônica, mesmo se somente uma parcela das 286 centrais de geração diesel existentes, com capacidade de 620MVA, adotassem módulos PV numa proporção diesel-PV otimizada [37]. Além disso, enquanto a distribuição da radiação solar na região é considerável, e com pequena variação sazonal, tal como demonstrado pelo mapeamento apresentado neste Atlas, a distribuição dos recursos eólicos na região é uma das piores do país (26,45 TWh/ano) [5]. Dessa forma, a tecnologia solar PV é uma das alternativas mais viáveis de energia renovável atualmente disponível para atender a demanda da região, que é dispersa e de relativamente pequena densidade energética. A economia de combustível fóssil e a redução de emissão de gases do efeito estufa são exemplos dos benefícios trazidos pela adoção de um sistema simples com a adição de gerador fotovoltaico sem capacidade de armazenamento de energia à uma planta térmica alimentada com óleo diesel. Acrescenta-se a isso a perspectiva de conversão futura para uma configuração fotovoltaico/célula de combustível resultaria numa geração 100% “limpa e renovável” baseada exclusivamente no recurso solar.

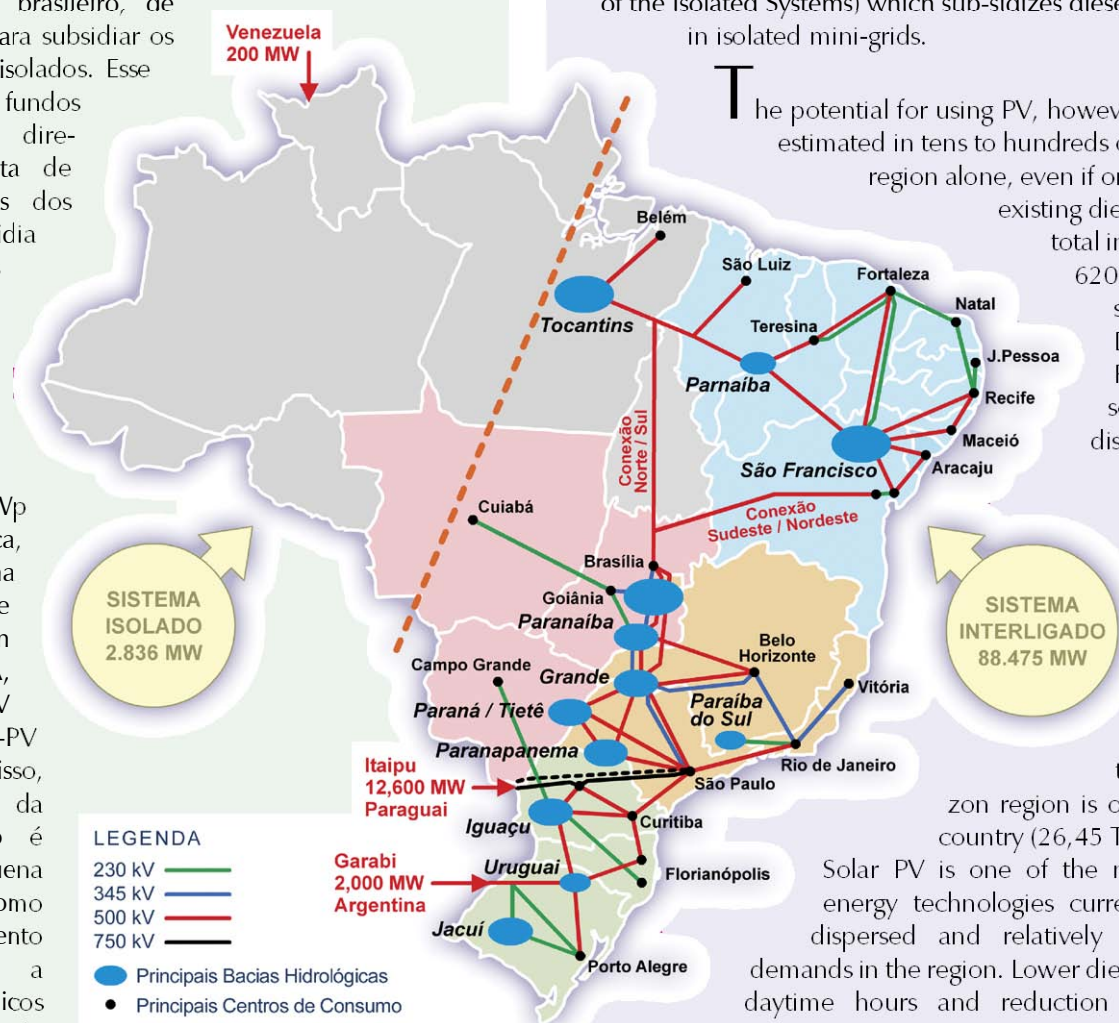


Figura 20. Sistema interligado de distribuição de eletricidade no Brasil [2].

covers 100% of the fuel, as long as they operate at or below the 0.34 l/kWh specific consumption limit. This government subsidy's life span has recently been extended for another 20 years. Utilities are allowed to include a surcharge to all urban and rural consumers of the national interconnected system to collect funds to subsidize consumers of these isolated systems. This surcharge system, and the funds collected, are directed to the so-called Isol-CCC Account (Fuel Consumption Account of the Isolated Systems) which sub-sidizes diesel for the thermal plants in isolated mini-grids.

The potential for using PV, however, is huge, and can be estimated in tens to hundreds of MWp in the Amazon region alone, even if only a fraction of the 286 existing diesel power plants with a total installed capacity of over 620 MVA would adopt some PV to an optimum DIESEL-PV mix [37]. Furthermore, while the solar radiation resource distribution in the region is considerable, and with a small seasonal variation, as demonstrated by the resource maps presented earlier in this Atlas, the wind resource distribution in the Amazon region is one of the worst in the country (26,45 TWh/ano) [5]. As a result, Solar PV is one of the most viable renewable energy technologies currently available for the dispersed and relatively small energy density demands in the region. Lower diesel consumption during daytime hours and reduction of greenhouse gases emission are examples of other benefits brought out by using simple hybrid DIESEL-PV system without storage, where PV systems are added to existing diesel thermal plants with prospects of future conversion to fuel cell / PV hybrid configurations, in which case energy generation would rely 100% on PV.

Figure 20. Interconnected system for electricity distribution in Brazil [2].

The solar radiation resource distribution in the region is considerable (around 5.5 MW/m²), and with a small seasonal variation. These features match up the technical standards requirements for mini-hybrid systems technology. Figure 21 shows, on an annual average, the daily PV generation yields, in kWh/kWp, that can be expected for the amorphous silicon thin-film PV technology deployed at latitude-tilted arrays in the Amazon region, together with the location of villages/towns and diesel-fired generation units in the region. Besides all the solar

O mapeamento dos recursos de energia solar mostram um elevado fluxo de radiação solar na região Amazônica (cerca de $5,5 \text{ MW/m}^2$) com baixa variabilidade inter-sazonal e adequada aos padrões técnicos recomendados para a tecnologia de mini-sistemas híbridos. A Figura 21 mostra, numa média anual, o potencial disponível para a geração diária PV, em kWh/kWp, que pode ser esperada para a tecnologia PV de silício amorfo em filme fino empregado na região da Amazônia, junto às pequenas cidades e vilarejos locais e unidades de geração diesel da região. Além dos mapas de disponibilidade solar apresentados neste Atlas, o projeto SWERA disponibiliza também dados numa base mensal, onde a variabilidade sazonal pode ser vista com maior detalhe (<http://swera.unep.net/>).

SISTEMAS PV INTERLIGADOS À REDE EM ÁREAS URBANAS

A maior parte do impressionante crescimento do mercado PV está relacionada a instalações conectadas à rede nos países desenvolvidos. Existe um imenso potencial para essa aplicação em áreas urbanas ensolaradas por todo o mundo. O Brasil está particularmente bem situado para esse tipo de aplicação, por causa da considerável disponibilidade de recurso energético solar, e o alto valor que pode ser dado a sistemas PV em áreas comerciais de centros urbanos ^[39]. Os mapas de irradiação solar em um plano inclinado no valor da latitude local apresentados neste Atlas (páginas 38 e 39) demonstram tanto a possibilidade de utilização de PV por todo o país quanto à pequena variação sazonal ao longo do ano. No levantamento da viabilidade econômica de projetos PV, informações mais detalhadas do comportamento sazonal da distribuição de radiação solar são necessárias, e a base de dados do projeto SWERA disponibiliza o mapeamento desse recurso solar em resolução temporal mensal (<http://swera.unep.net/>).

Sistemas PV podem contribuir para a capacidade máxima de uma rede se o pico de demanda ocorre no período diurno. Regiões comerciais com altas cargas de ar-condicionado no horário do meio-dia em geral possuem curvas de demanda em boa sincronia com a radiação solar ^[40, 41]. Outro fator importante para essa análise é a comparação entre os valores de pico de carga no inverno e no verão. Quanto maior a demanda no verão em comparação com o período de inverno, maior a possibilidade de a carga coincidir com a disponibilidade do recurso solar. Esse é o comportamento típico na maioria das capitais do Brasil. Curvas de dados de consumo das áreas urbanas de todo o país mostram diferença entre as regiões onde prédios comerciais dominam, apresentando picos de demanda no período diurno, e regiões residenciais, onde os valores de pico de demanda ocorrem ao anoitecer. Para fazer melhor proveito da natureza distribuída da geração solar de eletricidade, é importante

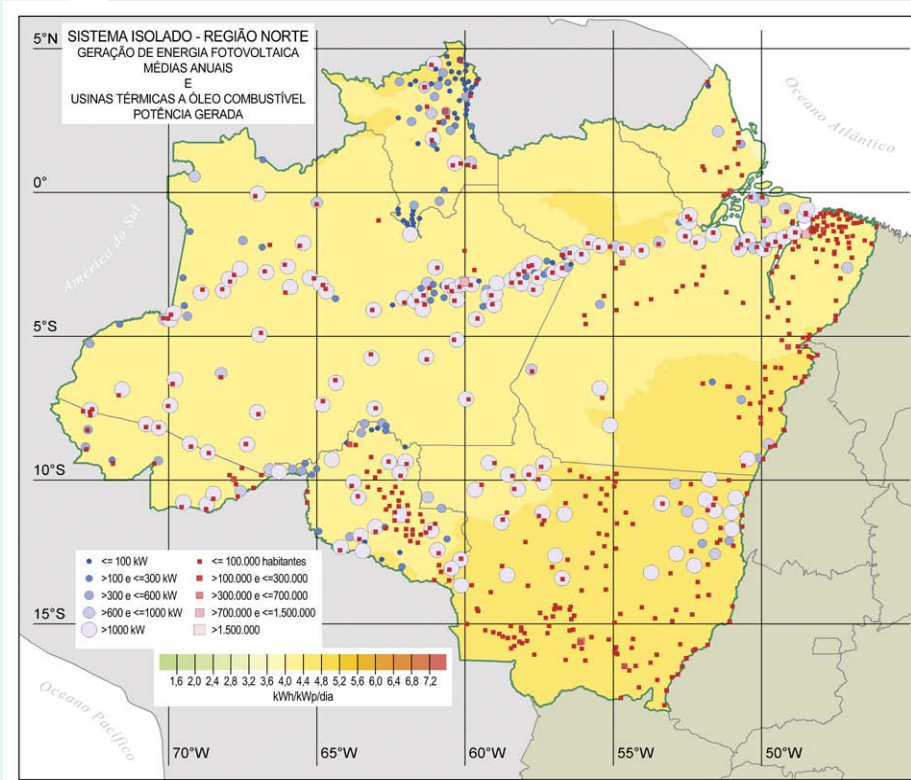


Figura 21. Potencial disponível para a geração diária PV, em kWh/kWp, na região da Amazônia ^[38].

Figure 21. The daily PV generation yields, in kWh/kWp, in the Amazon region ^[38].

resource maps shown in this Atlas, the SWERA project provides solar data on a monthly basis, where seasonal trends can be seen in more detail (<http://swera.unep.net/>).

GRID-CONNECTED PV SYSTEMS IN URBAN AREAS

The impressive growth in the PV market is related to grid-connected installations in developed countries. There is a huge potential for this application in sunny urban areas all over the world as well. Brazil is particularly well suited for the application of grid-connected PV due to both a considerable solar resource availability, and to the high value that can be attributed to PV in commercial areas of urban centers ^[39]. The maps on pages 38 and 39 present the annual and seasonal averages of the daily solar radiation availability at the latitude-tilted plane for the Brazilian territory, demonstrating both the potential of deploying PV all over the country, and the small seasonal variability throughout the year. In the assessment of the economic viability of PV projects, more detailed information on the seasonal behavior of the solar radiation resource distribution is necessary. Similar maps on a monthly basis are available in SWERA database (<http://swera.unep.net/>).

saber a capacidade PV de diferentes regiões da cidade quando instalando uma nova estação PV, de maneira a selecionar o consumidor com maior potencial de crédito. Nesse contexto, o conceito de Potencial Efetivo de Amenização de Carga de PV foi definido, para quantificar o potencial de crédito de uma instalação PV localizada estrategicamente [41, 42]. A Figura 22 mostra, para uma curva de demanda típica em um centro urbano, o efeito de redução de pico ao adicionar um pequeno número de módulos PV (por exemplo, 2m² de painéis fotovoltaicos de filme fino de silício amorfo com 15% de eficiência) para auxiliar na redução dos requisitos de carga da rede. Para determinar o potencial benefício dos sistemas PV como mostrado na Figura 22, é necessário conhecimento da distribuição da radiação solar numa base horária, e essa informação pode ser acessada para todo o território brasileiro através da base de dados gerada no projeto SWERA. Em um futuro próximo, quando o uso de sistemas PV interligados à rede elétrica se tornar mais difundido, com a redução dos custos e reconhecimento dos benefícios da geração PV distribuída, o levantamento do Potencial Efetivo de Amenização de Carga será de alto valor estratégico para fornecedores de energia e investidores.

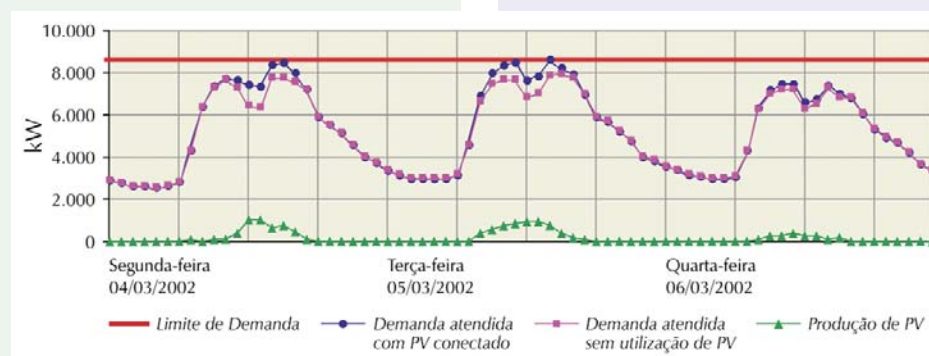


Figura 22. Efeito de redução de pico ao adicionar-se um pequeno número de módulos PV para auxiliar na redução dos requisitos de carga da rede numa curva de demanda típica de um centro urbano.

PV can contribute to a utility's capacity if the demand peak occurs in the day-time period. Commercial regions with high midday air-conditioning loads have normally a demand curve in a good synchronism with the solar irradiance [40, 41]. Another important factor in this analysis, is the comparison between the peak load values in summer and winter. The greater the demand in summertime in comparison with the demand in wintertime, the more closely the load is likely to match the actual solar resource. This is the typical picture of most capital cities in Brazil. Utility feeders in urban areas all over the country show distinct regions where commercial and office buildings dominate, and which present daytime peak demand curves, and residential regions where the peak demand values take place in the evening. To add value to the distributed nature of solar generated electricity, it is important to know the PV capacity of the different regions of a city when installing a PV

power plant, in order to select the feeder with the greatest capacity credit. In this context, the concept of the Effective Load Carrying Capacity (ELCC) of PV was defined, to quantify the capacity credit of a strategically sited PV installation [41, 42]. Figure 22 shows, for a typical daytime peaking utility feeder in an urban center, the peak-shaving effect of adding a small amount of PV to assist in reducing the load requirements of the feeder (for example using 2m² of a thin amorphous silicon PV panel with efficiency around 15%). To determine the

Figure 22. Peak-shaving effect of adding a small amount of PV to assist in reducing the load requirements of the feeder for a typical daytime peaking utility feeder in an urban center.

capacity benefits of PV as shown in Figure 22, knowledge of the solar radiation resource distribution on an hourly basis is necessary, and this information can be retrieved for the whole of the Brazilian territory through SWERA. In the near future, when the use of grid-connected PV becomes more widespread due to both cost reductions and the acknowledgment of the benefits of distributed PV, the assessment of ELCC will be of strategic value for utilities and investors.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (REFERENCES)

1. Goldemberg, J.; Villanueva, L. D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, 225p., 2003.
2. Agência Nacional de Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - BEN 2004**, 2004. [online] <http://www.mme.gov.br/>, 2005.
3. Stivari, S. M. S.; Oliveira, A. P.; Soares, J. On the climate impact of the local circulation in the Itaipu lake área. *Climatic Change*, 72(1-2):103-121, 2005.
4. Fearnside, P. M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una dam. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 10:675-691, 2005.
5. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. CEPEL/ELETROBRÁS/Ministério de Minas e Energia. 45p., 2001.
6. Tiba, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.
7. 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.
8. Pereira, E.B., Colle, S. A energia que vem do sol. **Ciência Hoje**. 22(130): 24-35. 1997.
9. 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.
10. 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.
11. Gambi, W. **Avaliação de um modelo físico estimador de irradiância solar baseado em satélites geoestacionários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.
12. Lenoble, J. **Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: standard computational procedures**. Virginia: A. Deepak Publishing, 1985.
13. 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.
14. 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.
15. 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, 2000.
16. Leckner, B. The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface – elements of a model. **Solar Energy**, 20(2): 143-150, 1978.
17. McClatchey, R. A.; Fenn, R. W.; Selby, J. E. A.; Volz, F. E.; Garin, J. S. **Optical properties of atmosphere**. Bedford, Massachusetts: Air Force Cambridge Research Laboratories, (AFCRL-72-0497), 108p, 1972.
18. Warren, S. G.; Hahn, C. J.; London, J.; Chervin, R. M.; JennE, R. **Global distribution of total cloud cover and cloud types amount over land**. DOE/ER/60085-H1, NCAR/TN-273+STR, NCAR Technical Notes, 1986.
19. Stephens, G. L. Radiation profiles in extended water clouds. II: parameterization schemes. **Journal of Atmospheric Science**, 35: 2123-2132, 1978.
20. Sellers, P.J.; Los, S.O.; Tucker, C.J.; Justice, C.O.; Dazlich, D.A.; Collatz, G.J.; Randall, D.A.. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. **Journal of Climate**, 9:706-737, 1995.

21. Harshvardhan; Davies, R.; Randall, D.A.; Corsetti, T.G. A fast radiation parameterization for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, 92:1009-1016, 1987.
22. BSRN, **Baseline Solar Radiation Network – Quality Assurance of Database**. World Meteorological Organization. [online]: <http://bsrn.ethz.ch/>.
23. Ceballos, J. C.; Bottino, M. J.; Souza, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **Journal of Geophysical Research**, 109, D2, D02211 10.1029/2003JD003531, 2004.
24. Rigollier, C.; Lefreve, M.; Wal, L. The method HELIOSAT-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. **Solar energy**, 77:159-169, 2004.
25. Zelenka, A.; Perez, R. Predicting solar irradiance from satellite – Estimated global irradiance and cloud cover. **Application of Satellite Technology - Annual Progress Report**. Geneva: World Meteorological Organization, 1986.
26. Perez, R. Seals, R.; Stewart, R. **Modelling irradiance on tilted planes: a simpler version of the Perez Model**. Proc. of ISES World Congress in Hamburg, Germany, 1987.
27. 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.
28. Diekmann, F. J.; Happ, S.; Rieland, M.; Köln, Benesch, W.; Offenbach, Czeplak, G.; Kasten F. An operational estimate of global solar irradiance at ground level from METEOSAT data: results from 1985 to 1987. **Meteorol. Rdsch.**, 41, 65-79, 1988.
29. INMET. Normais Climatológicas – 1931 a 1990. [online] <http://www.inmet.gov.br/>.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. European Database for Daylight and Solar Radiation, 2005. [online]: <http://www.satel-light.com/>.
34. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. [online]: <http://www.abrava.com.br/>.
35. Duffie J. A.; Beckman, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley, 2nd edition, 1991.
36. Rüther, R.; Schmid, A.; Beyer, H. G.; Montenegro, A.A.; Oliveira, S.H.F. Cutting on Diesel, boosting PV: The potential of hybrid DIESEL-PV systems in existing mini-grids in the Brazilian Amazon, Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy **Renewable and Rural Electrification Conversion**, Osaka - Japan, 555 – 558, 2003.
37. Beyer, H.G.; Rüther, R.; Oliveira, S.H.F. **PV systems as option to assist Diesel based electricity supply in the Brazilian Amazon**, in, Ed. G. Chakravarthy, A. Shukla & A. Misra, pp. 179 – 194, 2004.
38. ONS, **Operação Nacional do Sistema Elétrico Interligado: dados relevantes de 2001**.
39. Rüther, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**, ISBN 858758304-2, pp. 1 – 113, 2004.
40. Perez, R.; Letendre, S.; Herig, C. **PV and Grid Reliability: Availability of PV Power during Capacity Shortfalls**, Proceedings of the American Solar Energy Society - ASES Annual Conference, Washington, DC, , 1-4, 2001.
41. Knob, P.; Rüther, R.; Jardim, C.S.; Beyer, H.G. **Investigating the peak demand reduction capability of PV: A case study in Florianopolis, south Brazil**, Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris – France, 877 – 890, 2004.
42. Perez, R.; Seals, R.; Herig, C. **PV can add capacity fo the grid**, NREL Publication DOC/GO-10096-262, NREL, Golden – USA, 1996.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Matriz energética brasileira e (b) Matriz de...	9
Figura 2. Comparação dos desvios rRMSE das estimativas...	13
Figura 3. Diagrama simbólico dos processos de interação...	14
Figura 4. Fluxograma do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR	14
Figura 5. Localização das estações da base de dados do...	20
Figura 6. Mapa da média anual de temperatura obtido por...	20
Figura 7. Mapa da média anual de visibilidade obtido por...	20
Figura 8. Mapa da média anual de albedo de superfície obtidos por...	20
Figura 9. Mapa da média anual de umidade relativa obtido por...	22
Figura 10. Imagem de relevo gerada por interpolação (vizinho mais...	22
Figura 11. (a) Módulo de medidas da estação SONDA em Brasília...	22
Figura 12. Comparação entre as estimativas do modelo BRASIL-SR...	26
Figura 13. Histogramas de frequência dos desvios entre valores...	28
Figura 14. Gráfico de dispersão entre valores medidos e estimados...	28
Figura 15. Potencial anual médio de energia solar em cada uma...	48
Figura 16. Variabilidade dos valores... ao longo do ano para cada...	48
Figura 17. Variabilidade dos valores médios sazonais... para as cinco...	48
Figura 18. Análise de regressão linear aplicada às médias anuais...	50

FIGURES INDEX

Figure 1. (a) Brazilian energy matrix and (b) Electric power matrix	9
Figure 2. Comparison between rRMSE deviations observed for...	13
Figure 3. Diagram of radiative processes of solar radiation in the...	14
Figure 4. Flowchart of the BRASIL-SR radiative transfer model	14
Figure 5. Location of surface stations available in the NCDC database	20
Figure 6. Map for annual mean of temperature obtained...	20
Figure 7. Map for annual mean of visibility obtained by...	20
Figure 8. Map for annual mean of surface albedo obtained...	20
Figure 9. Map for annual mean of relative humidity obtained...	22
Figure 10. Topography image obtained from the “nearest neighbor”...	22
Figure 11. (a) Container of the SONDA site in Brasilia with the...	22
Figure 12. Scatter graphs between BRASIL-SR estimates for the daily...	26
Figure 13. Histograms of deviation frequencies between estimated...	28
Figure 14. Scatter plot between measured and estimated values...	28
Figure 15. Annual average potential of solar energy for each...	48
Figure 16. Variability of the annual mean values of solar irradiation...	48
Figure 17. Variability of the seasonal mean values of solar irradiation...	48
Figure 18. Linear regression analysis applied to the annual mean of...	50

Figura 19. _____	
(a) Energia total necessária para aquecimento e (b) tempo... _____	52
Figura 20.	
Sistema interligado de distribuição de eletricidade no Brasil _____	54
Figura 21.	
Potencial disponível para a geração diária PV... _____	54
Figura 22.	
Efeito de redução de pico ao adicionar-se um... _____	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.	
Estações da rede SONDA utilizadas na etapa... _____	22
Tabela 2.	
Número de PCD utilizadas para validação do... _____	24
Tabela 3.	
Desvios observados para as estimativas fornecidas... _____	26
Tabela 4.	
Desvios apresentados pelas estimativas de irradiação... _____	28
Tabela 5.	
Resultados apresentados para o cenário de adoção de... _____	52
Tabela 6.	
Estudo de Caso para a cidade de Brasília... _____	52

Figure 19.	
(a) Total required energy for water heating and (b) payback... _____	52
Figure 20.	
Interconnected system for electricity distribution in Brazil _____	54
Figure 21.	
The daily PV generation yields, in kWh/kWp, in the... _____	54
Figure 22.	
Peak-shaving effect of adding a small amount of PV... _____	56

TABLES INDEX

Table 1.	
The SONDA sites used to validate solar estimates... _____	22
Table 2.	
The AWS sites used to validate solar data provided... _____	24
Table 3.	
Deviations observed for the BRASIL-SR estimates... _____	26
Table 4.	
Deviations presented by direct normal radiation estimates... _____	28
Table 5.	
Results shown for the solar water heating scenario that... _____	52
Table 6.	
A case study for Brasilia - the results obtained for the... _____	52



United Nations Environment Programme

Projeto SWERA

(Solar and Wind Energy Resources Assessment)

United Nations Avenue, Gigiri
PO Box 30552, 00100
Nairobi, Kenya
Tel. 254 20 7621234
Fax. 254 20 7624489/90
<http://swera.unep.net/swera/>



Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
Divisão de Clima e Meio Ambiente

Av. dos Astronautas, 1758 - Jd. Granja
São José dos Campos - SP - Brasil
CEP 12227-010
Tel. 55 12 3945-6663 / 6656 / 6657
<http://www.cptec.inpe.br/>

ISBN85-17-00030-7



9 788517 000300

ISBN978-85-17-00030-0