

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA  
LABSOLAR – LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR – EMC/UFSC

## **ATLAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR DO BRASIL**

**(1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície)**

Brasília - DF, Outubro de 1998

## AUTORES

### **Prof. Dr. Sergio Colle – Coordenador**

LABSOLAR/NCTS – Laboratório de Energia Solar/Núcleo de Controle Térmico de Satélites  
Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina  
Caixa Postal 476 88040-900 Florianópolis - SC  
Fone: (048) 234 2161 / 234 5166 / 331 9379  
Fax: (048) 234 1519  
E-mail: [colle@emc.ufsc.br](mailto:colle@emc.ufsc.br)

### **Dr. Enio Bueno Pereira – Pesquisador Principal**

DGE/INPE – Divisão de Geofísica Espacial/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 12201-970 São José dos Campos – SP  
Fone: (012) 345 6741  
Fax: (012) 345 6810  
E-mail: [enio@dge.inpe.br](mailto:enio@dge.inpe.br)

## COORDENAÇÃO

LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar

Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC

## INSTITUIÇÕES COLABORADORAS

INPE / DGE e DSA – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Divisão de Geofísica Espacial e  
Divisão de Satélites Ambientais

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

GKSS - Institut für Atmosphärenphysik - Geesthacht - Alemanha  
Deutscher Wetterdienst (DWD) Potsdam - Alemanha

## COLABORADORES

### A – EQUIPE DE PESQUISA

Prof. Dr. Ehrhard Raschke – GKSS – Institut für  
Atmosphärenphysik – Geesthacht – Alemanha

Dr. Rolf Stuhlmann – GKSS – Institut für  
Atmosphärenphysik – Geesthacht – Alemanha

Dr. Klaus Dehne – DWD – Deutscher Wetterdienst –  
Potsdam – Alemanha

M. Eng. Mec. Samuel L. de Abreu – LABSOLAR –  
EMC/UFSC

Eng. Paulo Couto – LABSOLAR - EMC/UFSC

Eng. Sylvio L. Mantelli Neto – INPE/LABSOLAR

Eng. Luiz Fernando L. Antoneli – LABSOLAR – EMC/UFSC

Físico M. Sc. Fernando Ramos Martins – INPE

Físico M. Eng. Waldênio Gambi – LABSOLAR – EMC/UFSC

Renato A Spillere – Bolsista CNPq – LABSOLAR –  
EMC/UFSC

### B – EQUIPE DE APOIO LOGÍSTICO

Eng. Milton Carneiro – ELETROBRÁS

Eng. Roland C. Arteaga – ELETTRONORTE/UHE Balbina

Eng<sup>a</sup>. Ivonice Ayres Campos - MCT

Eng. Pedro Sérgio Torres - ELETTRONORTE

Dr. Evandro Sérgio Camelo Cavalcanti - CEPTEL

Eng. Lourival Baschiroto – CELESC

Técnico José E. Basto – LABSOLAR – EMC/UFSC

Técnico Sérgio Lima – ELETTRONORTE/UHE Balbina

## INSTITUIÇÕES DE APOIO

Secretaria de Desenvolvimento Científico - Ministério da Ciência e Tecnologia / RHA/E

CELESC - Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.

FINEP/CEPEL - Centro de Pesquisa da ELETRORBRAS

AFF - Associação de Fruticultores de Fraiburgo - SC

ELETRORBRAS/ELETRONORTE

Secretaria de Cooperação Internacional - SCI/CNPq

CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico / Engenharias e Informática

CLIMERRH – Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos – SC

KFA / Jülich - Alemanha

BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung - Alemanha

WMO - World Meteorological Organization / BSRN - Baseline Surface Radiation Network

## APRESENTAÇÃO

O presente atlas é uma consolidação de dados de irradiação global, computados com o algoritmo do modelo físico BRAZILSR, com base em dados de satélite geostacionário. Tal modelo é uma vertente do modelo físico IGMK (Instituto de Geofísica e Meteorologia de Colonia – Alemanha), cujo algoritmo foi transferido para o LABSOLAR, no contexto de um projeto de cooperação bilateral no âmbito da SCI – Secretaria de Cooperação Internacional/CNPq e KFA – Jülich/BMFT – Ministério de Ciência e Tecnologia da Alemanha. Tal projeto foi iniciado em 1992 e concluído em 1998. O algoritmo mencionado, inicialmente operacional para o satélite METEOSAT-2, numa primeira fase, foi adaptado para o satélite METEOSAT-3 e numa segunda fase, para o satélite GOES-8. Os dados computados foram validados com base nos dados coletados nas estações solarimétricas do INMET (1985/86), do LABSOLAR e ABRACOS – INPE (1995/98). O atlas representa o estado da arte de dados de irradiação solar para o Brasil, em nível de qualidade equivalente aos atlas existentes na Europa Central e nos Estados Unidos. Espera-se que a presente versão possa servir de fonte de dados confiável para profissionais usuários de dados de irradiação solar no país. Essa versão é a primeira de uma série programada, no contexto das atividades do INMET.

## ÍNDICE

<u>AUTORES</u>	2
<u>COORDENAÇÃO</u>	3
<u>INSTITUIÇÕES COLABORADORAS</u>	3
<u>COLABORADORES</u>	4
<u>INSTITUIÇÕES DE APOIO</u>	5
<u>APRESENTAÇÃO</u>	6
<u>INTRODUÇÃO</u>	8
<u>ESTAÇÕES SOLARIMÉTRICAS DO LABSOLAR</u>	9
<u>DESCRIÇÃO DO MODELO BRAZILSR</u>	11
<u>AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS</u>	15
<u>IMAGENS DE IRRADIAÇÃO</u>	17
<u>VARIAÇÃO DECENAL DE 1985/86 E 1995/98</u>	31
<u>VARIAÇÃO INTERANUAL 1996/1997</u>	35
<u>IRRADIAÇÕES MÉDIAS E VARIABILIDADES REGIONAIS</u>	37
<u>VALIDAÇÃO DO MODELO BRAZILSR</u>	41
<u>VALIDAÇÃO DO MODELO PARA CÉU CLARO</u>	41
<u>VALIDAÇÃO DO MODELO PARA CÉU ENCOBERTO</u>	42
<u>COMPARAÇÃO DOS DADOS DO MODELO BRAZILSR E DADOS DA</u>	
<u>OLADE - ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA</u>	48
<u>CONCLUSÕES</u>	61
<u>AGRADECIMENTOS</u>	62
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	63

## INTRODUÇÃO

O impacto crescente da emissão de CO<sub>2</sub> proveniente dos combustíveis fósseis e da biomassa nas mudanças climáticas, tem levado as economias desenvolvidas à apoiarem estudos para busca de alternativas energéticas que venham a substituir as energias convencionais. Uma das formas que tem despertado interesse mundial é a energia solar, por ser a mesma renovável e abundante em toda a superfície de representatividade econômica do planeta. A radiação solar é a força motriz do movimento da atmosfera e também dos processos ligados à vida. Como tal ela deveria ser conhecida na sua extensão e na sua qualidade, a fim de que a sociedade possa, à luz da razão, explorar o máximo benefício dessa forma de energia. O atual estágio do conhecimento permite-nos antever um cenário em que a energia solar venha a ser utilizada na geração de energia elétrica fotovoltaica e termosolar, na refrigeração passiva e na agroindústria, a exemplo do que já vem ocorrendo com sucesso em aplicações domésticas. Todavia, mesmo para estudos preliminares de viabilidade econômica de energia solar, dados médios mensais de mínima incerteza tornam-se necessários.

Existem inúmeros métodos para estimar a irradiação solar na superfície, tais como o pioneiro método de Angström [1,2] e suas variantes [3], os métodos estatísticos baseados em satélite [4,5,6] e os métodos baseados em modelos físicos [7,8,9]. Diferentemente dos métodos estatísticos, que necessitam de dados em longas séries anuais e fornecem apenas médias no período, os métodos físicos são capazes de fornecer dados horários, incorporando quaisquer variações climáticas relevantes. O algoritmo BRAZILSR, presentemente operacional no LABSOLAR, oferece a vantagem adicional de computar dados atuais de boa confiabilidade, nas bases, de três horas (horários sinóticos), diária e mensal. Dados de irradiação difusa e PAR (*Photochemically Active Radiation*), na mesma base, também podem ser computados.

Muito embora os dados computados até o presente tenham boa concordância com os dados coletados nas estações disponíveis, torna-se imperativa a comparação desses dados para um número maior de estações de superfície qualificadas. O nível de qualificação de instrumentos, exigido para validação de dados derivados de satélite, foi estabelecido por comitê especial da WMO – World Meteorological Organization, no contexto do projeto BSRN – Baseline Surface Radiation Network [10]. O projeto BSRN tem por objetivo estabelecer uma base de dados de radiação solar a nível mundial para apoiar as atividades científicas de investigação das mudanças climáticas no planeta. O LABSOLAR, parceiro da BSRN, é presentemente responsável pelas estações BSRN – Florianópolis e BSRN – Balbina, as quais tem sido estações de referência para validação do presente atlas.

## ESTAÇÕES SOLARIMÉTRICAS DO LABSOLAR



Figura 1 - BSRN Florianópolis – SC – Bancada de instrumentos de medição solar – detalhe do radiômetro de cavidade Hickey-Frieden



Figura 2 - BSRN Florianópolis – SC – Sistema de aquisição de dados



Figura 3 - BSRN Balbina – AM – Detalhe de bancada de instrumentos de medição solar



Figura 4 - BSRN Balbina – AM – Vista externa da estação e torre de instrumentos



Figura 5 – Estação LABSOLAR  
AFF – Lebon Régis – SC



Figura 6 – Estação LABSOLAR  
CELESC – Maracajá – SC

## DESCRIÇÃO DO MODELO BRAZILSR

O modelo BRAZILSR emprega imagens do canal visível do satélite geoestacionário GOES-8 para estimar a irradiância solar na superfície. O modelo pressupõe que as nuvens são o principal fator de modulação do fluxo de radiação solar que atinge a superfície. Como a transmitância e reflectância das nuvens são inversamente correlacionadas à irradiância solar refletida de volta para o espaço no topo da atmosfera,  $\tau_p$  cresce com a espessura ótica das nuvens,  $\tau_a$  enquanto que a irradiância solar na superfície,  $\tau_g$  decresce. Assim, o valor mínimo da irradiância no topo da atmosfera, observado em condições de céu claro, é função da transmitância atmosférica e do albedo de superfície. Em condições de céu completamente nublado, a espessura ótica das nuvens alcança seu valor máximo; e a irradiância no topo da atmosfera, atinge seu valor máximo que é função do albedo das nuvens.

Estas duas condições extremas podem ser modeladas com precisão satisfatória. No entanto, não se pode dizer o mesmo das situações intermediárias entre elas a condição de céu encoberto (*all sky*). A parametrização da transmitância da radiação solar nessas condições intermediárias é realizada, supondo-se que a irradiância no topo da atmosfera possa ser dividida em duas componentes independentes, a saber:

- a) contribuição de céu claro,  $\tau_{clear} = f(\tau_B, I_0, \tau_z, \tau_s)$
- b) contribuição de céu completamente nublado,  $\tau_{cloud} = g(I_0, \tau)$

onde  $\tau_B$  é a transmitância atmosférica (devida aos gases atmosféricos e aerossóis),  $I_0$  é o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera,  $\tau_z$  é o ângulo zenital solar,  $\tau_s$  é o albedo de superfície e  $\tau$  é a espessura ótica das nuvens.

Ambas as contribuições podem ser estimadas facilmente, considerando-se que a transmitância atmosférica e a espessura ótica das nuvens, podem ser determinadas utilizando-se dados climatológicos obtidos rotineiramente. A natureza aleatória da radiação solar na superfície é parametrizada através da definição do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens,  $n_{eff}$ , de modo que  $\tau_p$ , esteja linearmente correlacionada com as duas condições atmosféricas extremas,  $\tau_{clear}$  e  $\tau_{cloud}$ : como segue

$$\tau_p = \tau(1 - n_{eff})\tau_{clear} + n_{eff}\tau_{cloud} \quad (1)$$

Portanto

$$n_{eff} = (\tau_p - \tau_{clear}) / (\tau_{cloud} - \tau_{clear}) \quad (2)$$

Supondo-se que  $n_{eff}$ , definido em toda a faixa espectral da radiação solar, possa ser adequadamente representado em termos das leituras digitais dos sensores dos satélites,  $L$ , em faixas espectrais estreitas, a Equação (2) pode ser escrita como segue

$$n_{eff} \square (L - L_{min}) / (L_{max} - L_{min}) \tag{3}$$

onde os índices *min* e *max* representam, respectivamente, os valores mínimo e máximo das leituras do satélite em um dado pixel da imagem. Deve-se notar que o lado esquerdo da Equação (3) é adimensional e portanto independente do fator de calibração do sensor do satélite utilizado na medida.

A principal hipótese feita no modelo BRAZIL SR é a da existência de uma correlação inversa entre a transmitância e a cobertura efetiva de nuvens representada por

$$\square_{hor} = \square (1 - n_{eff}) + \square \tag{4}$$

onde  $\square$  e  $\square$  são constantes e  $\square_{hor}$  é a transmitância total normalizada, definida por

$$\square_{hor} = (\square \cdot \square_{cloud}) / (\square_{clear} - \square_{cloud}) \tag{5}$$

Essa dependência linear pode ser verificada através da comparação de medidas de superfície da irradiância solar e valores de  $n_{eff}$  obtidos a partir de imagens de satélite. A tabela 1 abaixo apresenta os resultados para um teste de linearidade realizado, utilizando-se um piranômetro da estação BSRN-Florianópolis. Pode-se observar que o coeficiente  $\square$  é aproximadamente igual a unidade, conforme o esperado.

Tabela 1 - Verificação experimental da correlação inversa entre a transmitância total e a cobertura efetiva de nuvens.

<b>Mês</b>	$\square$	$\square$	$r^2$	<b>Nº. de imagens</b>
Julho	1,01	0,01	0,85	150
Outubro	1,01	-0,03	0,90	139
Novembro	0,93	0,02	0,90	118
Dezembro	0,99	-0,03	0,91	93

Por conseguinte, pode-se inferir que

$$n_{eff} = 1 - (\tau_{cloud}) / (\tau_{clear} - \tau_{cloud}) \tag{6}$$

Rescrevendo a equação (6) em função da irradiância incidente no topo da atmosfera,  $I_{\tau_0}$ , obtêm-se para o fluxo de radiação solar incidente na superfície como segue

$$I_{\tau} = [n_{eff} \tau_{clear} + (1 - n_{eff}) \tau_{cloud}] I_{\tau_0} \tag{7}$$

Desta forma, para se obter o valor da irradiação solar global na superfície  $I_{\tau}$  são necessárias somente duas condições adicionais que parametrizam as transmitâncias  $\tau_{clear}$  e  $\tau_{cloud}$ . Essa duas transmitâncias são estimadas pelo modelo através de um modelo de transferência radiativa de dois fluxos (*two-stream*), desenvolvido por Schmetz [31]. Este modelo unidimensional de transferência radiativa inclui a absorção e espalhamento pelos gases e aerossóis, supondo atmosferas-padrão realísticas. Os parâmetros de entrada do modelo são o albedo de espalhamento simples,  $\beta$ , a profundidade óptica  $\tau$  e o fator de assimetria  $g$ , como descrito pelas equações diferenciais acopladas do esquema de dois fluxos Lenoble [21].

Diversos perfis de atmosferas-padrão são adotados pelo modelo citado; alta latitude, latitude média (verão e inverno) e tropical. O modelo simula uma atmosfera não-homogênea pela divisão dos perfis de pressão em trinta e um níveis, o que define trinta camadas homogêneas de espessuras  $\Delta z$  que vão da superfície até o topo da atmosfera. Para cada camada atribui-se valores de densidade de ar seco, concentrações de ozônio e bióxido de carbono e os parâmetros de dos aerossóis  $\tau$  e  $g$ . Adicionalmente, o vapor d'água e a concentração de aerossóis são atribuídos a partir de aproximações exposta mais adiante neste texto.

Os fluxos difusivos para cima  $F^+$  e para baixo  $F^-$ , são obtidos resolvendo-se as equações diferenciais acopladas descritas no esquema de dois fluxos, para cada uma das camadas atmosféricas definidas, sujeitas às seguintes condições de contorno

$$F_i^+(\tau = 0) = F_{i+}^+(\tau = 0) \tag{8}$$

onde  $F_i$  é o fluxo difusivo de energia aplicado para a  $i$ -ésima camada (contando de baixo para cima). A condição de contorno no topo da atmosfera e na superfície permitem que o sistema de equações acopladas seja resolvido e sejam obtidos os valores estimados para as densidades de fluxo de radiação na superfície e, consequentemente, os dois valores de  $\tau_{clear}$  e  $\tau_{cloud}$ .

Em resumo, o modelo BRAZILSR estima a radiação solar incidente na superfície a partir dos dados de cobertura efetiva de nuvens obtidos com um satélite geoestacionário e das transmissâncias nas duas condições atmosféricas extremas: céu claro e céu nublado.

As parametrizações dos perfis de vapor d'água e dos aerossóis são realizadas de forma a permitir que o modelo seja alimentado com dados atmosféricos facilmente disponíveis e de forma rotineira. Para isso, empregou-se aproximações como as descritas a seguir.

Para o perfil de vapor d'água foi empregada a aproximação empírica de Leckner [20] dada pela expressão:

$$w = 0.493 R_h p_s / T \tag{9}$$

$$P_s = \exp(26.23 - 5416 / T) \tag{10}$$

Onde  $R_h$  é a umidade relativa do ar ao nível do solo,  $P_s$  é a pressão parcial do vapor d'água no ar saturado e  $T$  é a temperatura absoluta do ar. Visto que 50% do total de água precipitável da atmosfera encontra-se distribuído nos primeiros quilômetros da atmosfera, uma correção simples foi aplicada para levar em conta as variações de altitude dos locais onde se pretende estimar a radiação solar. Isto é particularmente importante visto que ficou demonstrado por Diekmann *et al.* [16] e Gambi [17] que a transmitância da atmosfera apresenta um comportamento assintótico com respeito ao vapor d'água na atmosfera. Desta forma, nos locais de maior elevação, esse fenômeno é crítico. A correção efetuada foi feita através da conversão adiabática da temperatura  $T$  das Equações (9) e (10), entre o nível do mar e a altitude do alvo.

No caso dos aerossóis, também empregou-se uma parametrização bastante simples, mas que permitiu o emprego de dados atmosféricos facilmente disponíveis de forma rotineira. Foi empregada a aproximação empírica dada por Angström [3]:

$$\tau_{a0} = \exp(-\tau_0^m m_a) \tag{11}$$

onde  $\tau_0$  e  $\tau_0^m$  são coeficientes e  $m_a$  é a massa óptica do ar. O coeficiente  $\tau_0$ , também conhecido como coeficiente de turbidez de Angström, foi estimado empregando-se os dados de visibilidade horizontal  $V/S$ , da atmosfera e convertidos pela expressão empírica dada por McClatchey and Selby [23],

$$\tau_0 = (0.55)^{\tau_0^m} (3.912 / V/S)^{0.01162} [0.02472(V/S)^5 + 1.132] \tag{12}$$

O valor de  $\Delta$ , na equação de Angström está relacionado com o tamanho das partículas de aerossóis. Foram atribuídos valores realísticos para esse coeficiente nos intervalos 0 – 2 km, 2 – 10 km e acima de 10 km. A aproximação acima permite inferir a transmitância dos aerossóis em superfície, onde os dados de visibilidade horizontal são disponíveis. Para outras altitudes, assume-se que a visibilidade cresce de forma exponencial até um máximo 150km a 2km de altitude. Essa é uma aproximação simples mas produz resultados bastante bons para a aplicação do modelo na maioria das situações encontradas na prática.

## AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

O modelo emprega dados do sensor de radiação visível (0,52  $\mu$ m a 0,72  $\mu$ m) do satélite GOES-8, também conhecido como “GOES-East”. Este satélite está localizado a 75°W sobre a linha do equador e tem uma órbita geoestacionária, isto é, acompanha a rotação da Terra. Os dados brutos, na forma digital, são coletados a cada três horas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Satélites Ambientais (INPE/DAS), localizado em Cachoeira Paulista, SP. A resolução espacial em superfície das imagens adquiridas é de 8km por 4,6km. Após qualificação, as imagens são registradas em discos ópticos CD-ROM e documentadas no acervo histórico de imagens do projeto.

Os dados de entrada do modelo são as coberturas efetivas de nuvens  $n_{ef}$  calculadas pela Equação (3) para cada pixel da imagem. O diagrama de blocos do programa de tratamento e interface dos dados com o modelo é apresentado nas figuras 7 e 8.

O modelo também requer informações sobre os constituintes da atmosfera, do albedo de superfície e da altitude, para poder gerar os perfis atmosféricos realistas que serão empregados nos cálculos do esquema de dois fluxos descrito acima. Visto que as nuvens constituem o principal fator de modulação do fluxo da radiação na atmosfera, os outros constituintes da atmosfera constituem parâmetros de segunda ordem e podem ser parametrizados a partir de médias climatológicas. Desta forma, os valores de entrada de temperatura e umidade relativa são obtidos a partir do arquivo das Normais Climatológicas dos últimos trinta anos, editado pelo INMET [19]. As altitudes foram obtidas a partir dos dados disponíveis no EROS Data Center – Distributed Active Archive Center (EDC-DAAC), USA, na resolução horizontal de 2” e resolução vertical de cem metros. Os dados de albedo foram obtidos a partir dos produtos do DAAC-Langley ISCCP, USA. Todos esses dados foram reduzidos à mesma resolução final em superfície de 0,5° x 0,5° adotada para essa versão operacional do modelo, muito embora outras resoluções sejam também possíveis de se obter sob encomenda.

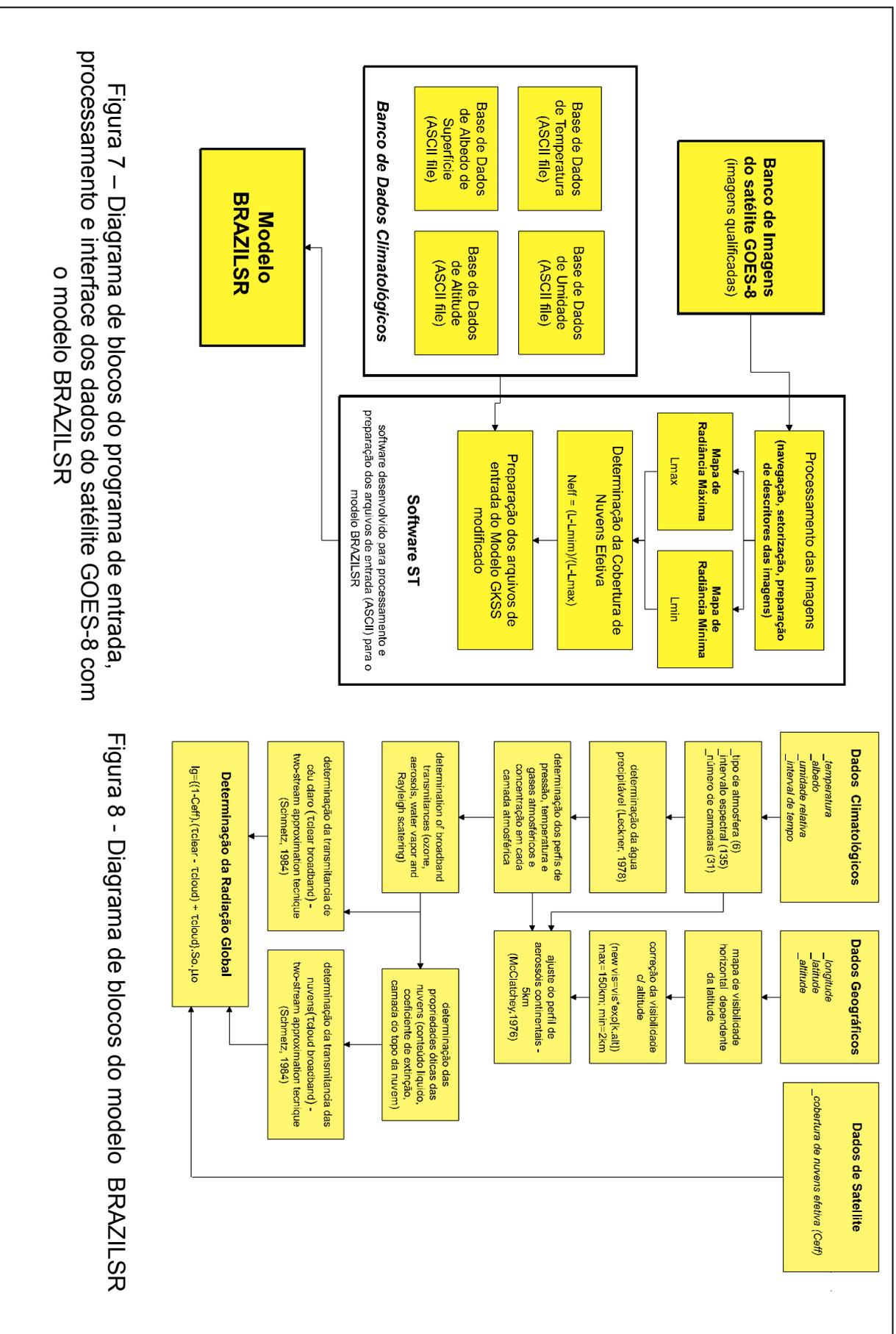


Figura 7 – Diagrama de blocos do programa de entrada, processamento e interface dos dados do satélite GOES-8 com o modelo BRAZILSR

Figura 8 - Diagrama de blocos do modelo BRAZILSR

## IMAGENS DE IRRADIAÇÃO

As figuras 9 à 34 ilustram as imagens de irradiação mensal e as variabilidades diárias no mês. As imagens foram construídas efetuando-se as médias de irradiação mês a mês no período de 1995 a 1998, empregando-se todos os dados disponíveis neste período. Assim, as figuras representam meses típicos no período de 1995 a 1998.

Os valores de irradiação são fornecidos em  $Wh/m^2$ , por ser esta unidade a mais usual. Contudo, para converter os valores de irradiação para o Sistema Internacional ( $kJ/m^2$ ), basta multiplicar os valores de irradiação por 3,6.

As imagens de irradiação foram obtidas por interpolação, a partir de uma matriz de estimativas geradas pelo modelo, com resolução de  $0,5^\circ$  de latitude por  $0,5^\circ$  de longitude, o que corresponde a um setor de, aproximadamente 50 km x 50 km no equador. A escala de cores correspondentes as faixas de interpolação é a mesma para cada figura, o que permite uma comparação visual direta entre cada imagem.

As imagens de variabilidades diárias no mês foram gerados calculando-se os desvios padrões em cada setor de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  durante o respectivo mês. Este desvio, normalizado pela média mensal do mês em cada setor foi denominado de variabilidade e é fornecido nas figuras em valores percentuais:

$$VAR_j = \frac{1}{x_j} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2} \quad (13)$$

O índice  $j$  refere-se ao  $j$ -ésimo setor da imagem,  $x_{i,j}$  é o valor da irradiação diária  $\bar{x}_j$  é o valor médio da irradiação e  $n$  é o número de dias no mês. A variabilidade quantifica o nível da variação da irradiação diária naquele mês. Essa variabilidade é de grande importância tanto para estudos climáticos como para o planejamento da aplicabilidade dos recursos energéticos solares.

As figuras 9 e 10 correspondem às imagens das irradiações médias anuais para o período e os respectivos níveis de variabilidade mensais, calculados de forma análoga às variabilidades diárias no mês.

## MÉDIA ANUAL TÍPICA

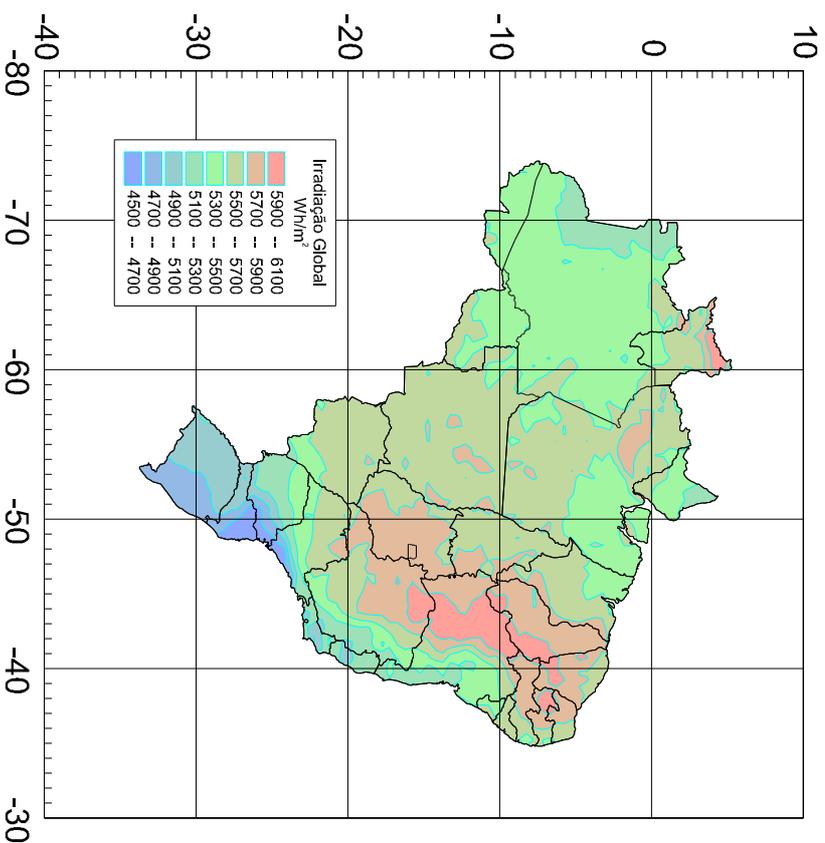


Figura 9 - Irradiação média anual

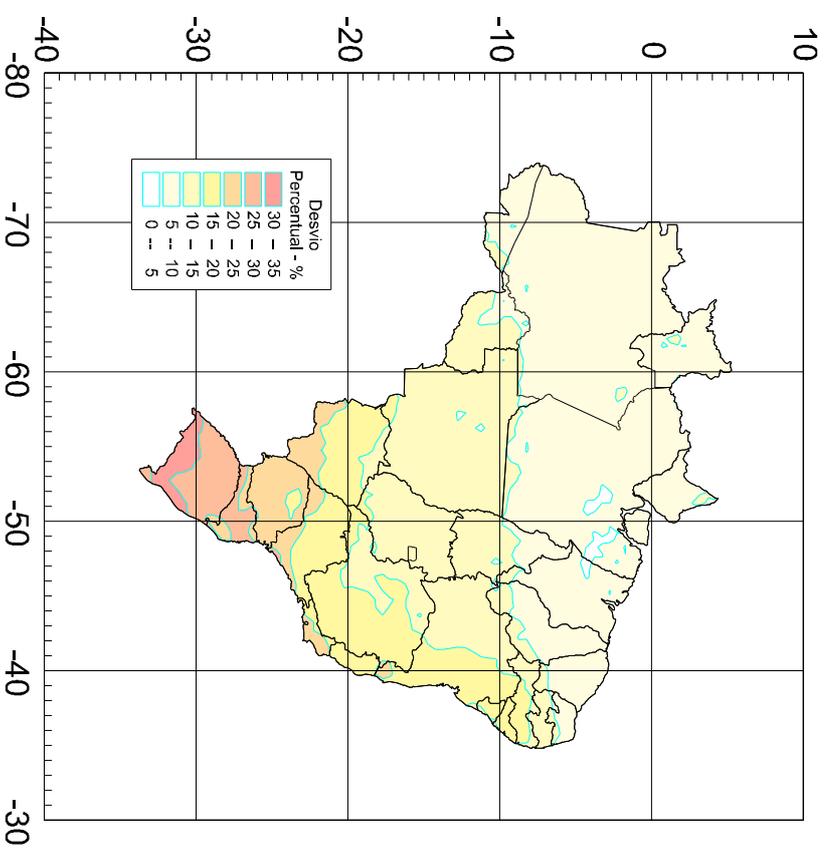


Figura 10 - Variabilidade mensal da irradiação anual

MÉDIA MENSAL TÍPICA - JANEIRO

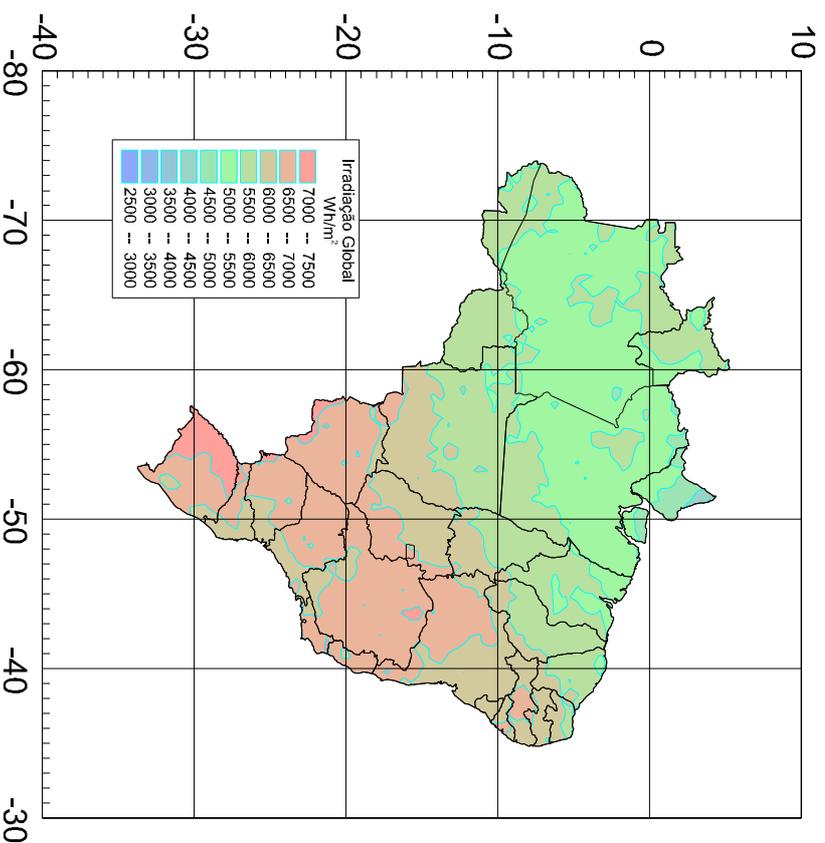


Figura 11 - Irradiação média

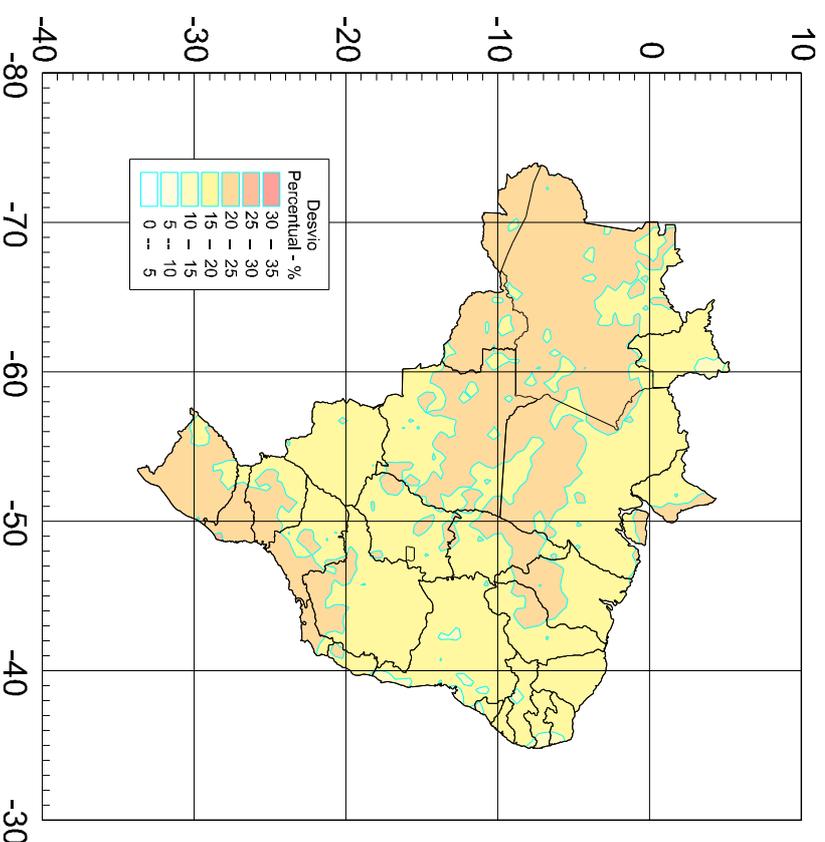


Figura 12 - Variabilidade diária no mês

## MÉDIA MENSAL TÍPICA - FEVEREIRO

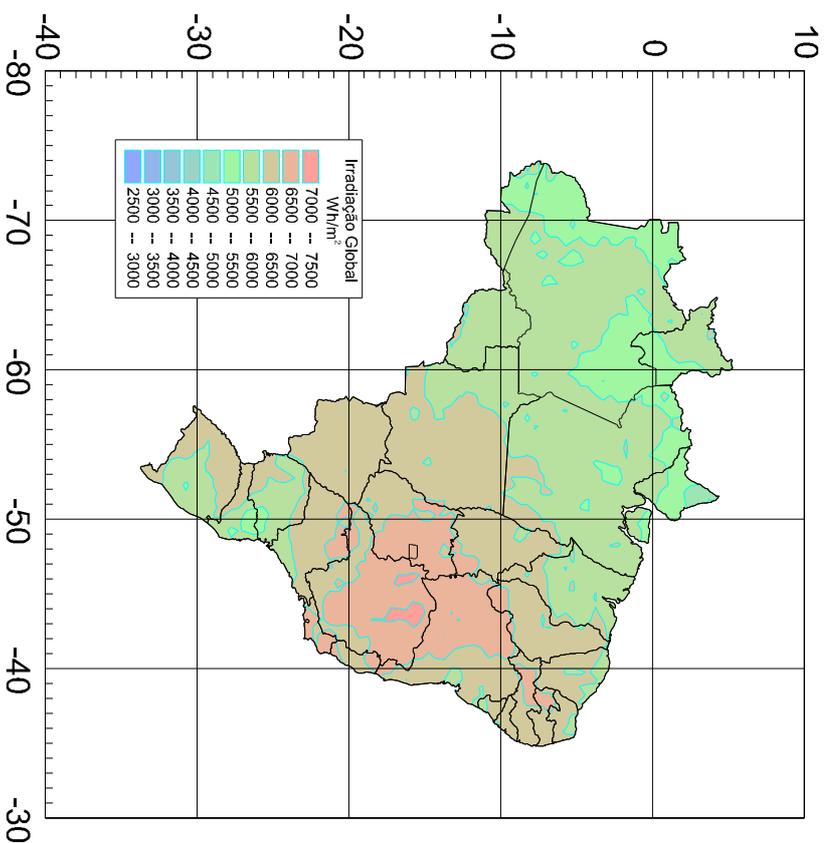


Figura 13 - Irradiação média

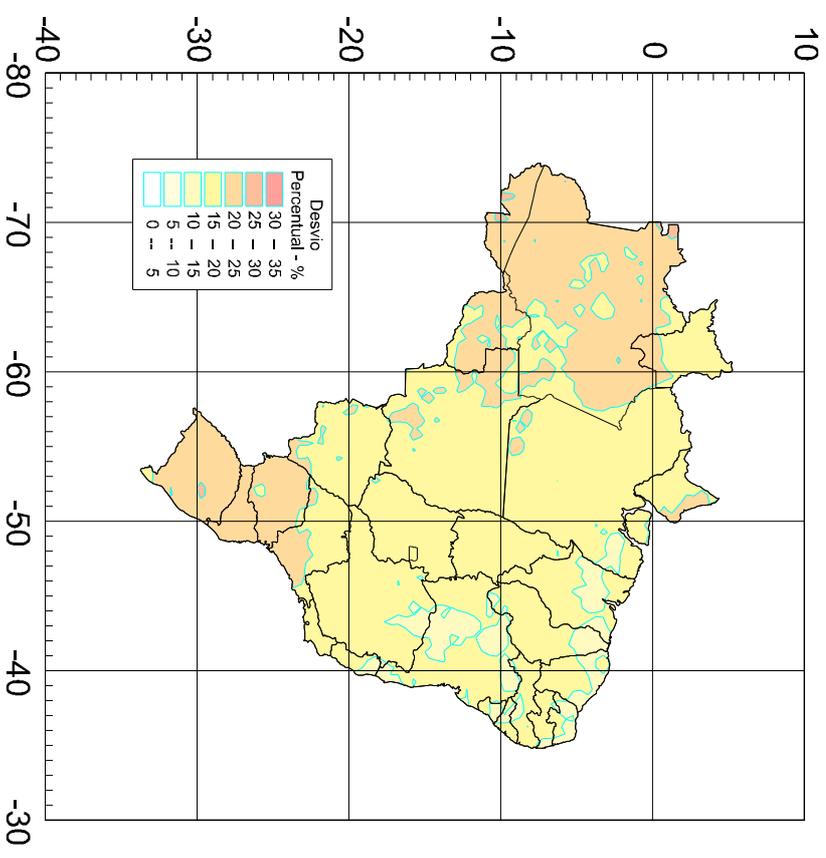


Figura 14 - Variabilidade diária no mês

## MÉDIA MENSAL TÍPICA - MARÇO

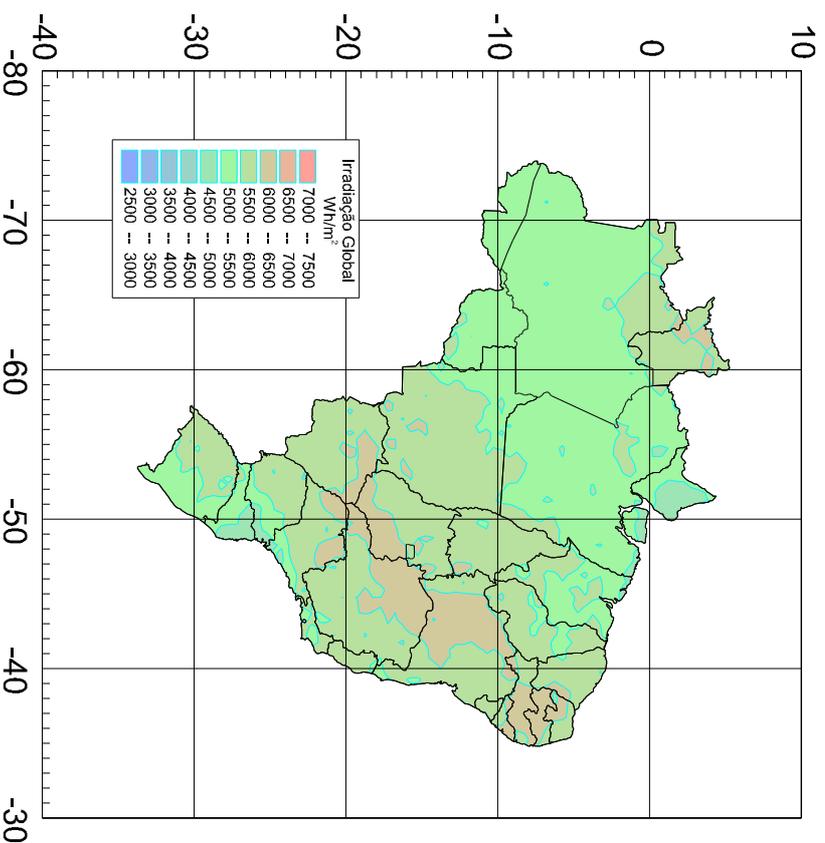


Figura 15 - Irradiação média

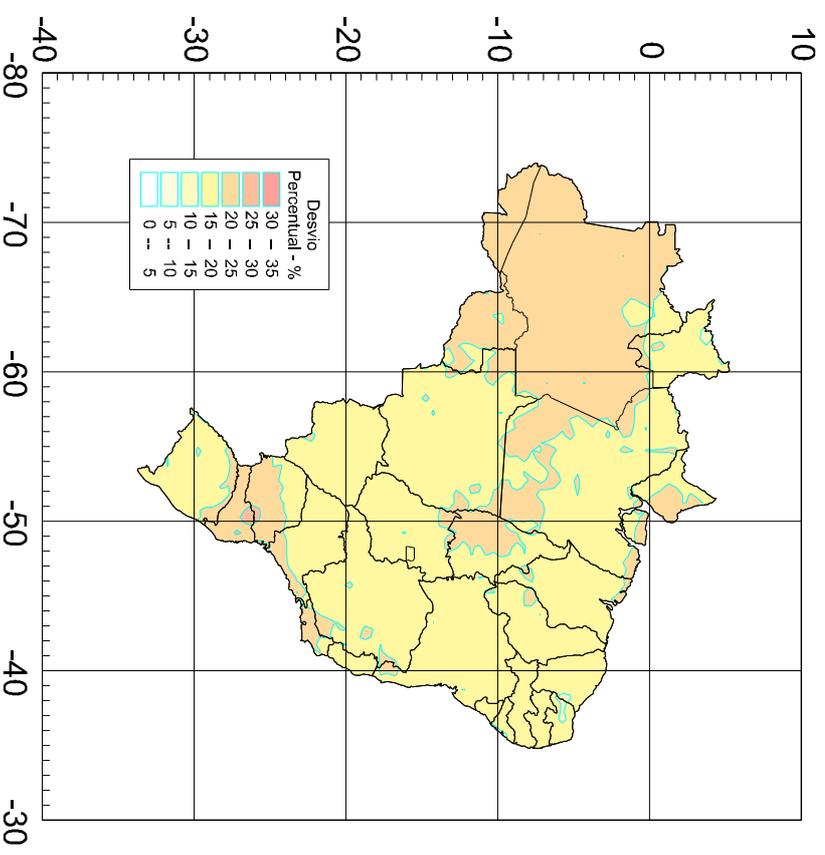


Figura 16 - Variabilidade diária no mês

MÉDIA MENSAL TÍPICA - ABRIL

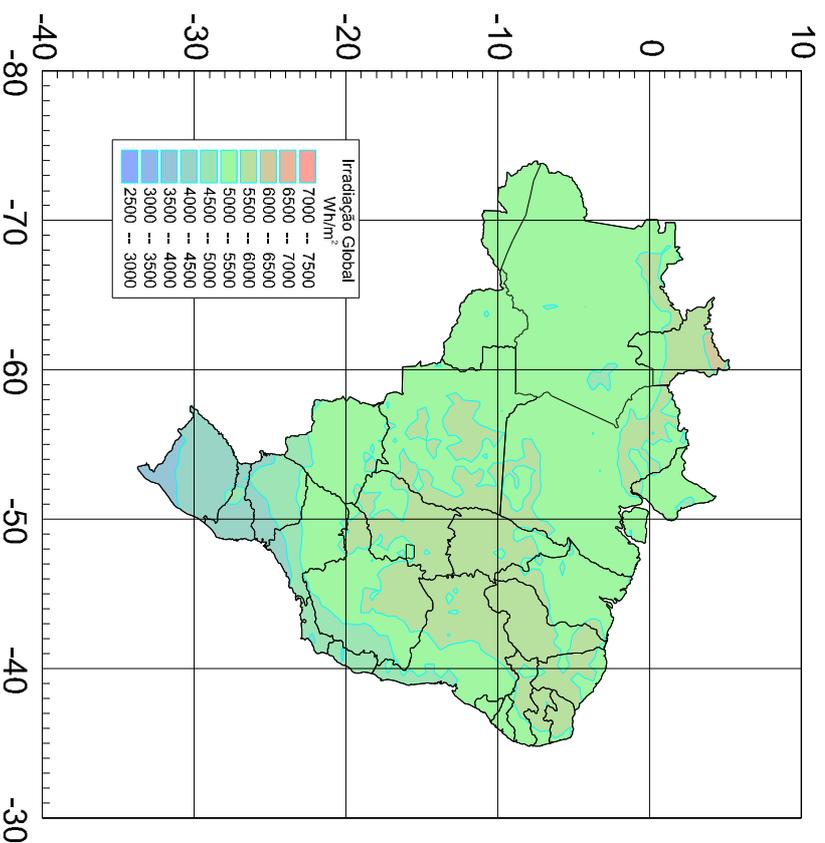


Figura 17 - Irradiação média

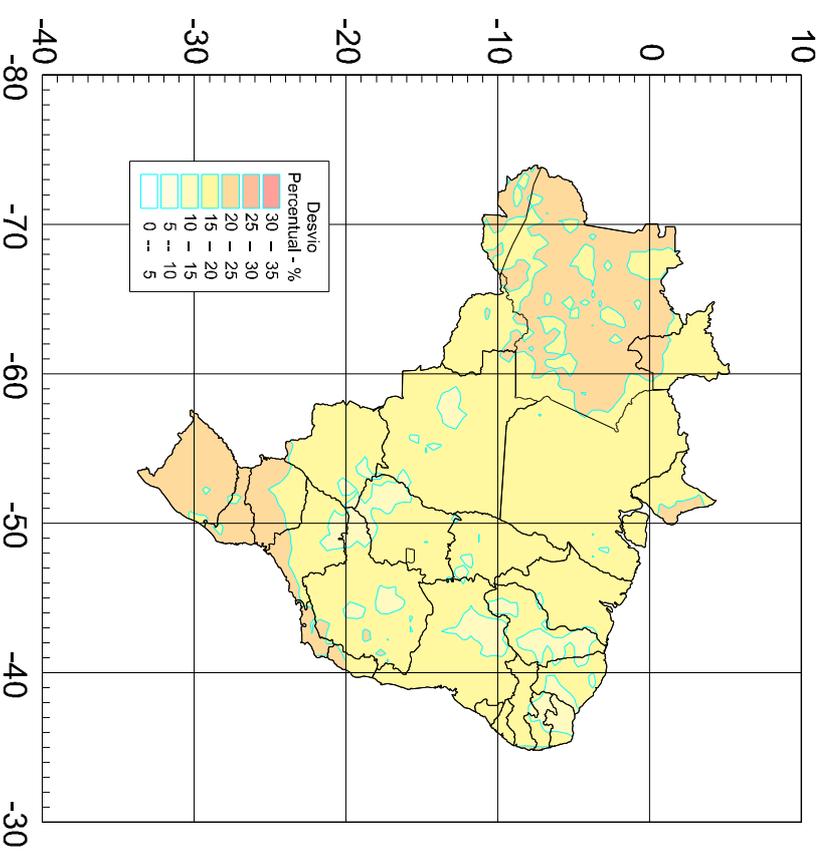


Figura 18 - Variabilidade diária no mês

MÉDIA MENSAL TÍPICA - MAIO

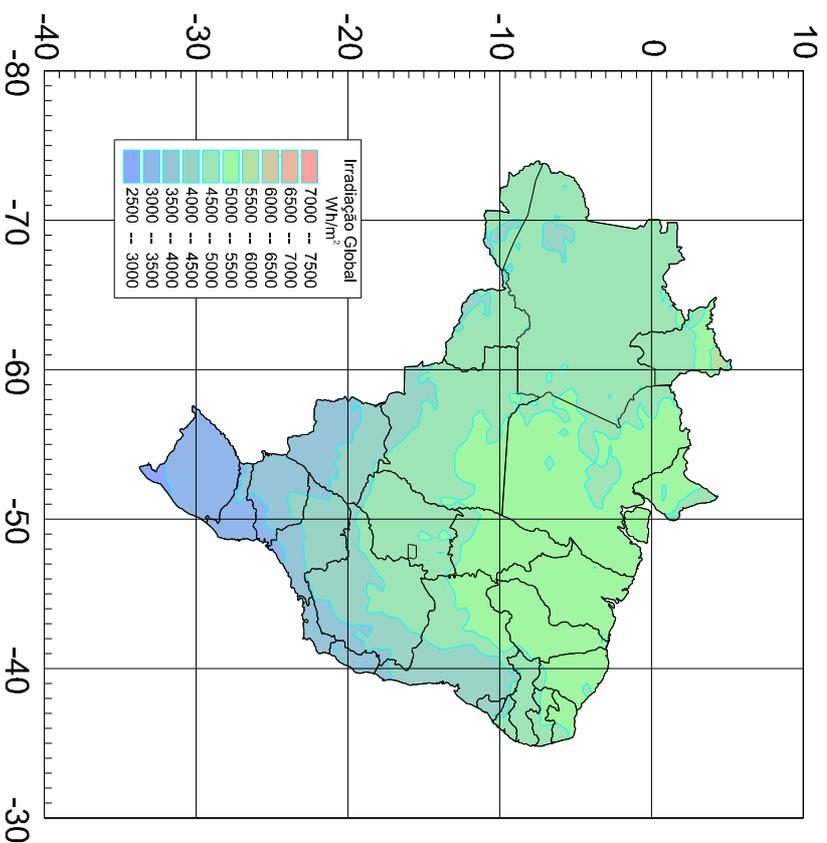


Figura 19 - Irradiação média

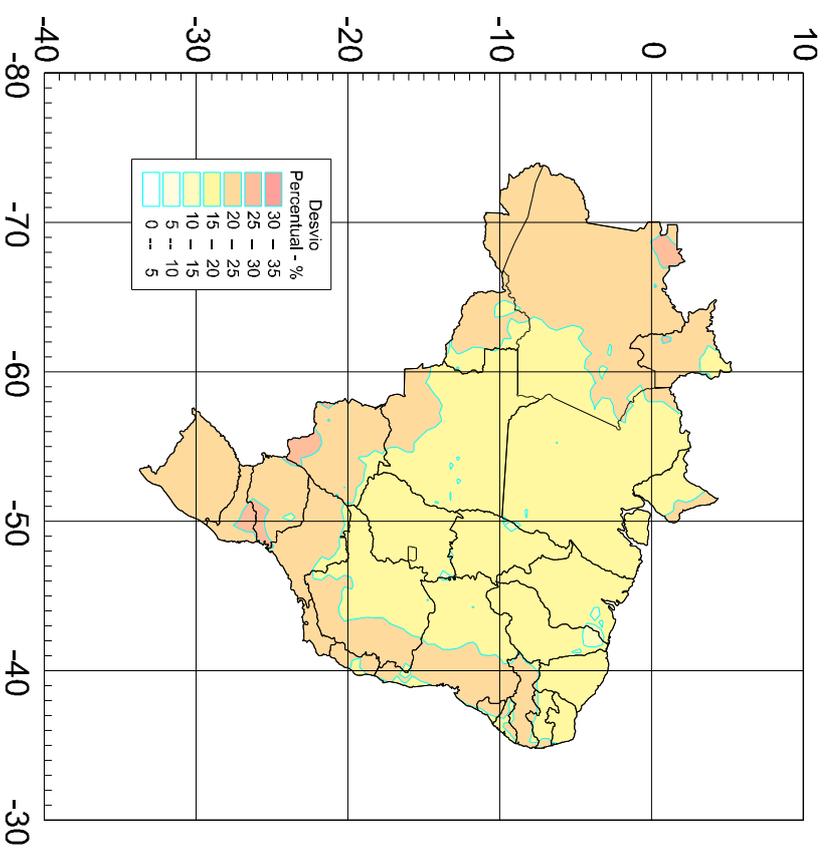


Figura 20 - Variabilidade diária no mês

MÉDIA MENSAL TÍPICA - JUNHO

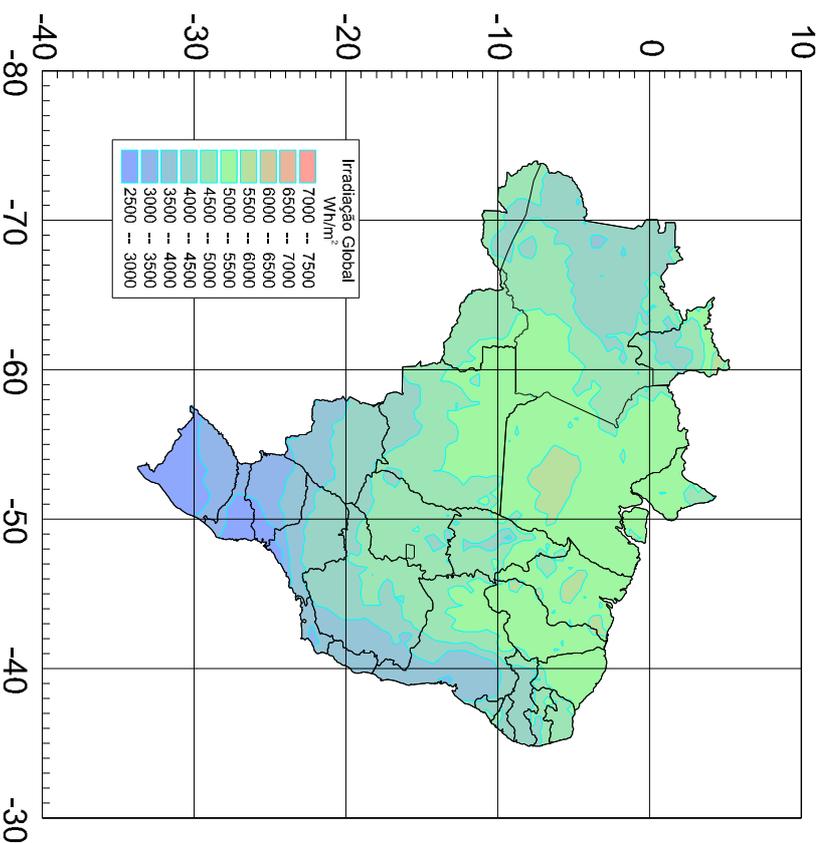


Figura 21 - Irradiação média

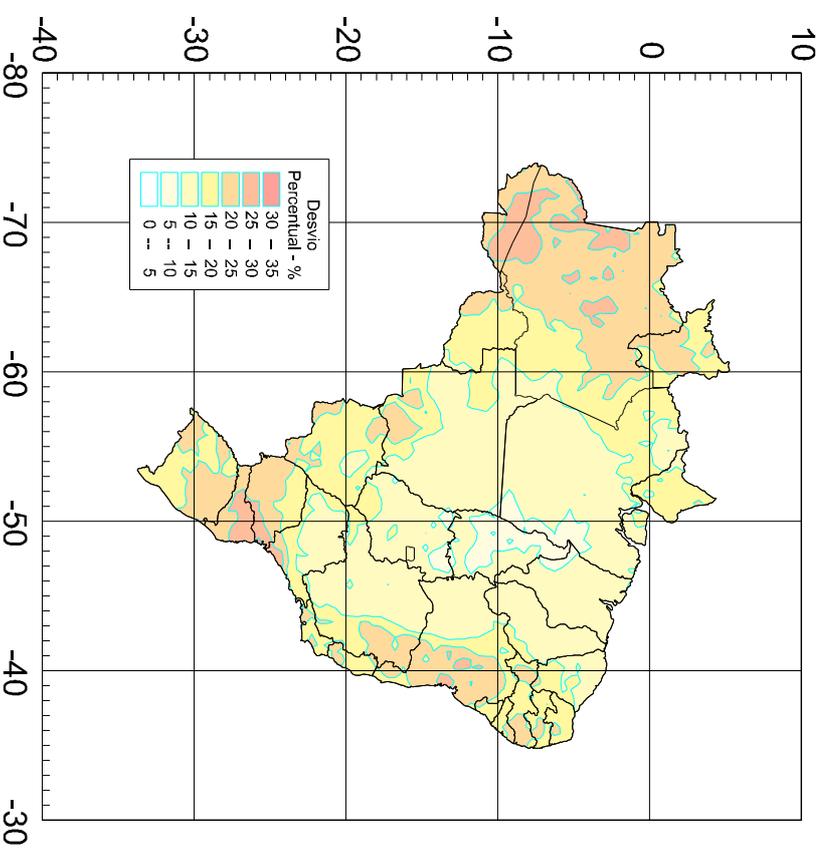


Figura 22 - Variabilidade diária no mês

MÉDIA MENSAL TÍPICA - JULHO

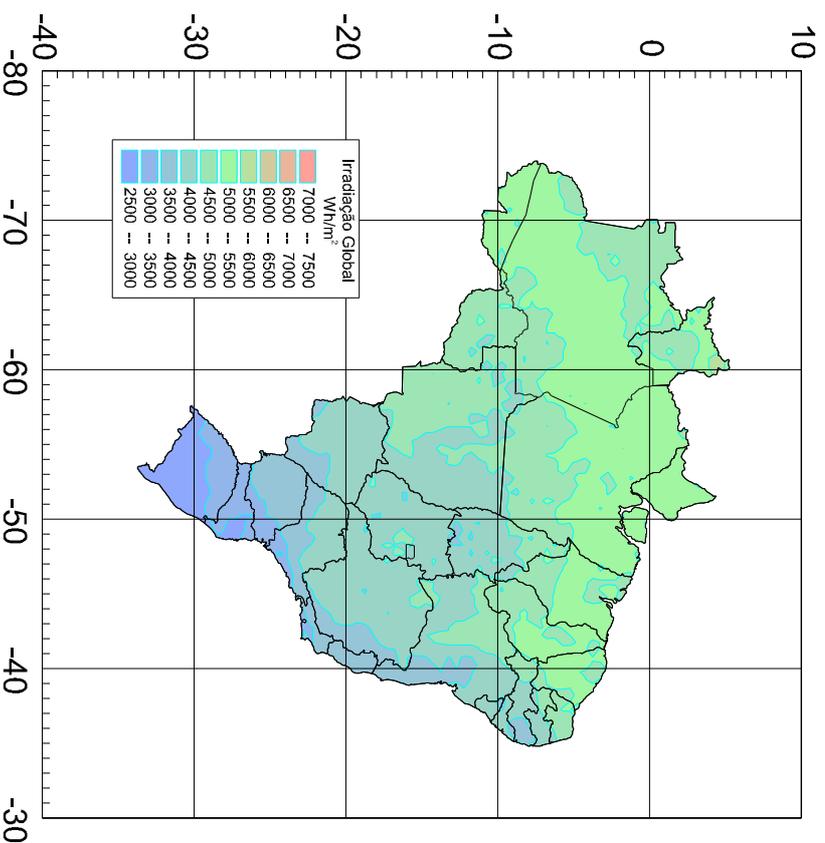


Figura 23 - Irradiação média

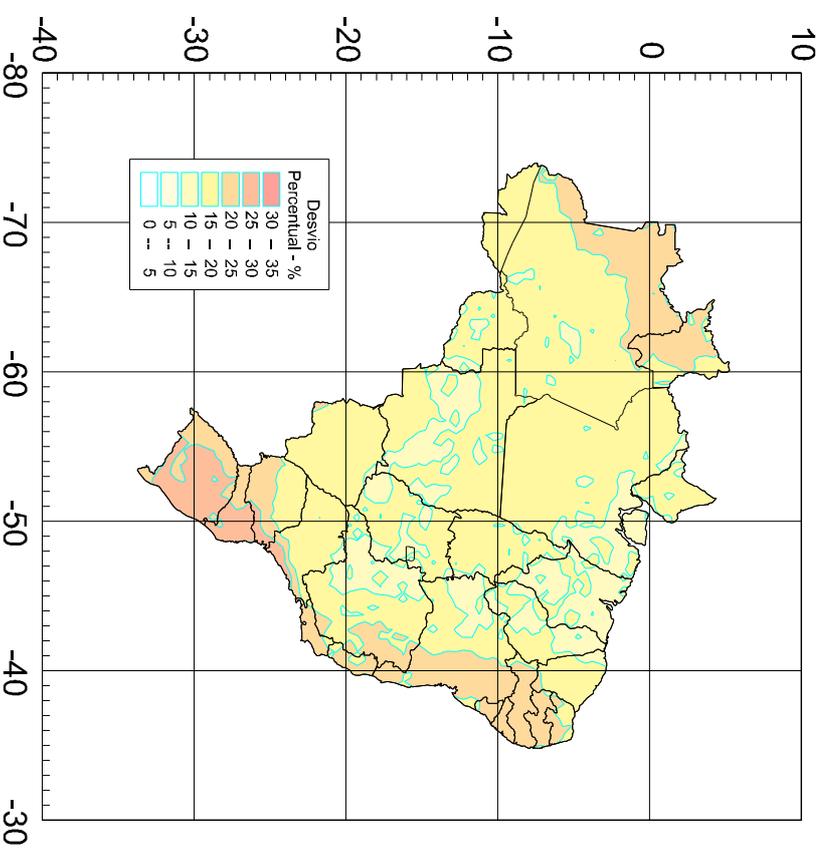


Figura 24 - Variabilidade diária no mês

## MÉDIA MENSAL TÍPICA - AGOSTO

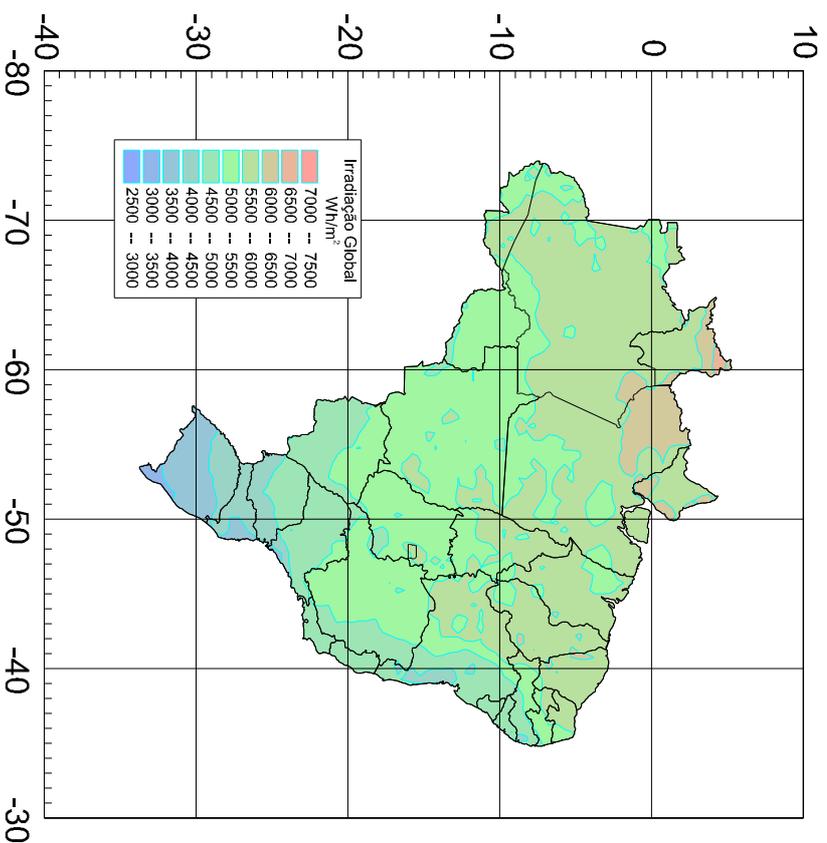


Figura 25 - Irradiação média

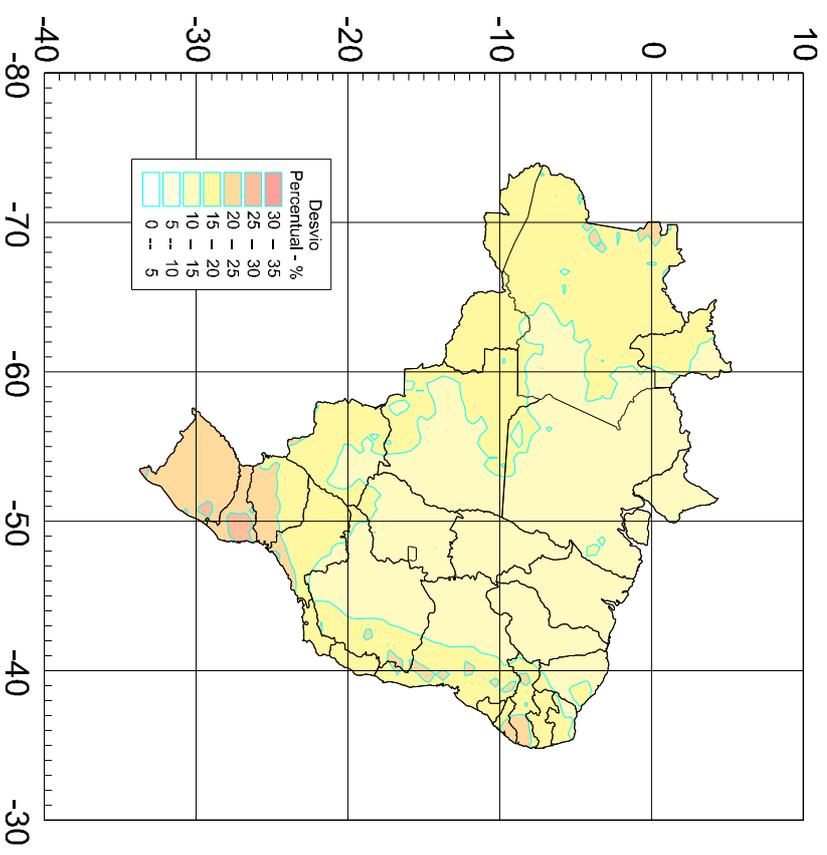


Figura 26 - Variabilidade diária no mês

MÉDIA MENSAL TÍPICA - SETEMBRO

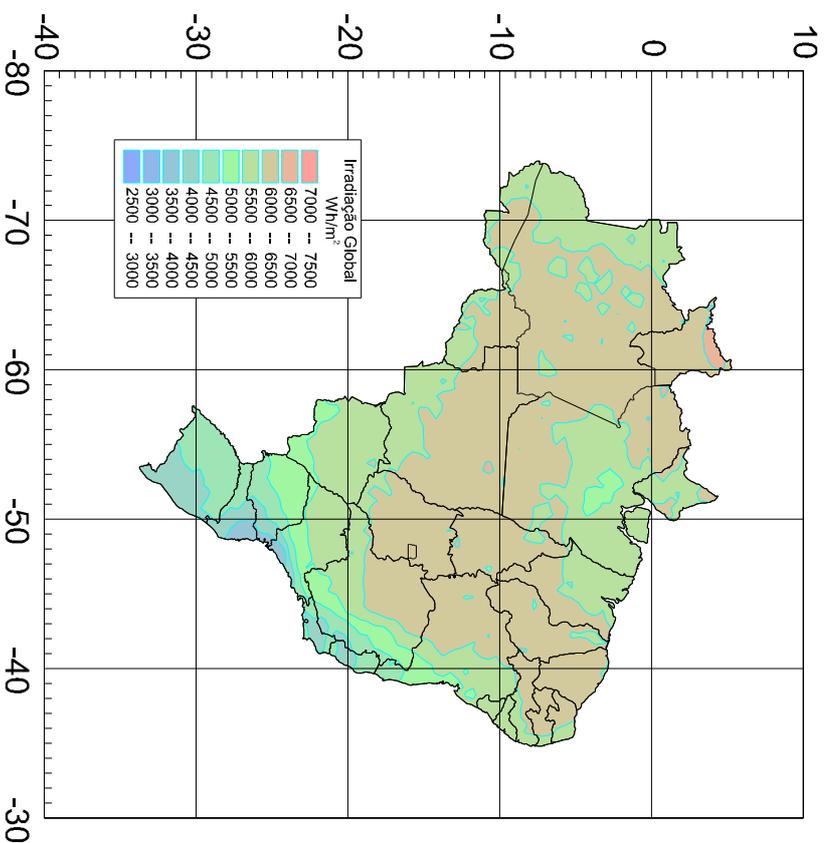


Figura 27 - Irradiação média

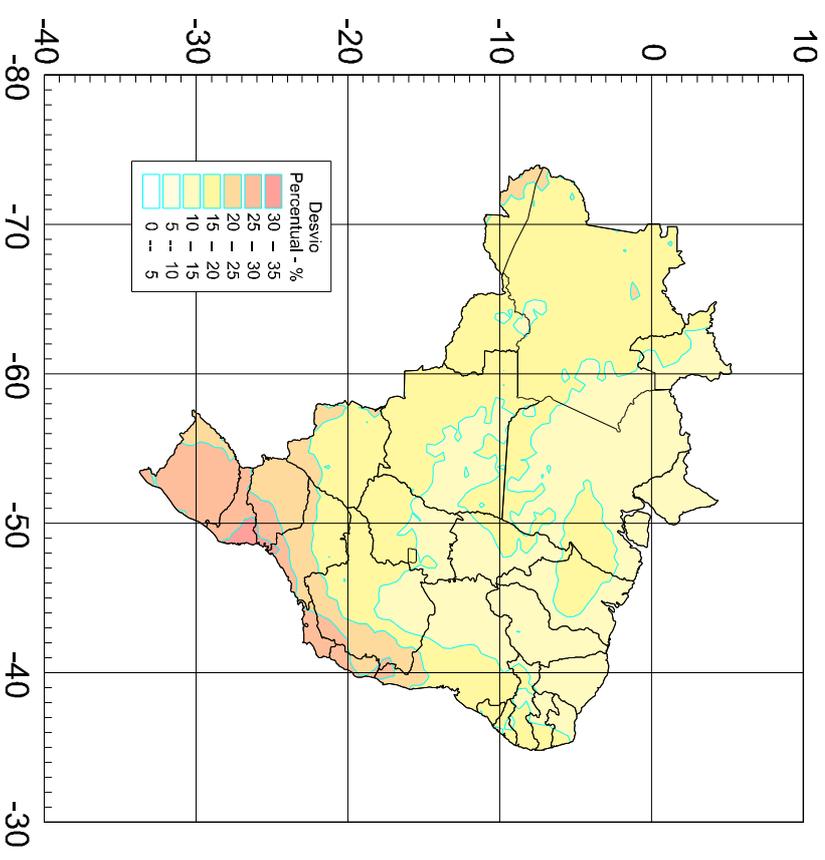


Figura 28 - Variabilidade diária no mês

## MÉDIA MENSAL TÍPICA - OUTUBRO

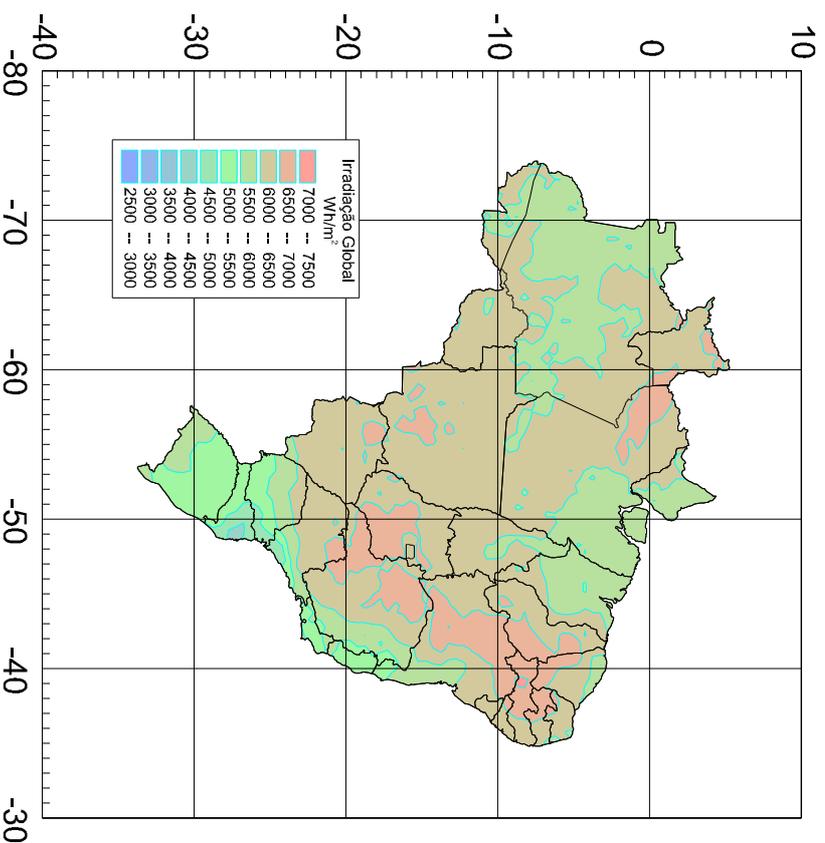


Figura 29 - Irradiação média

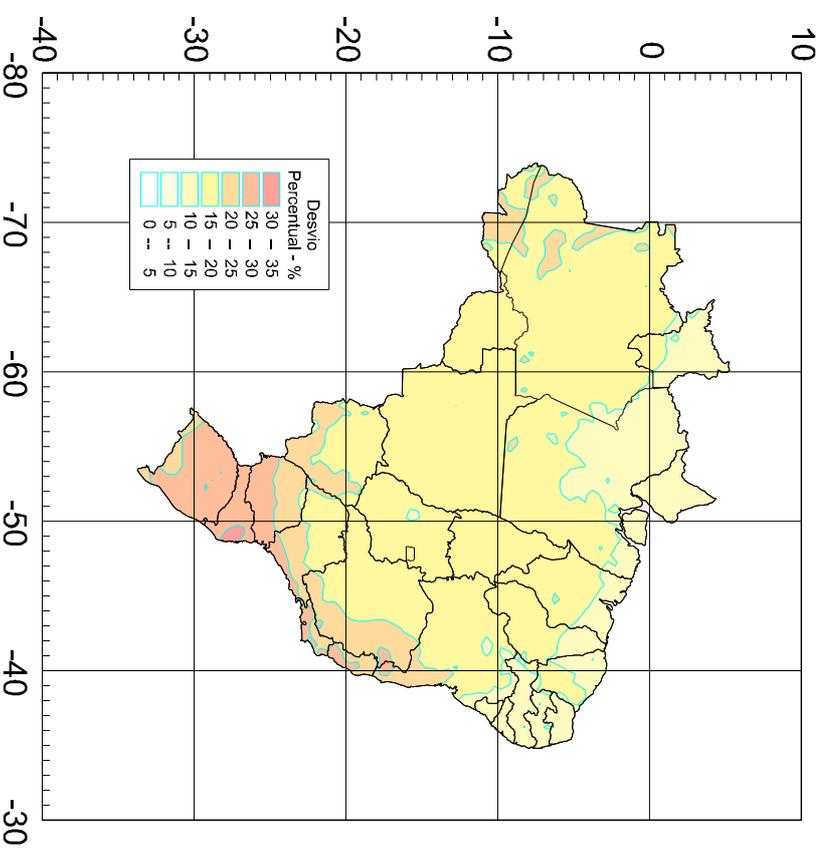


Figura 30 - Variabilidade diária no mês

MÉDIA MENSAL TÍPICA - NOVEMBRO

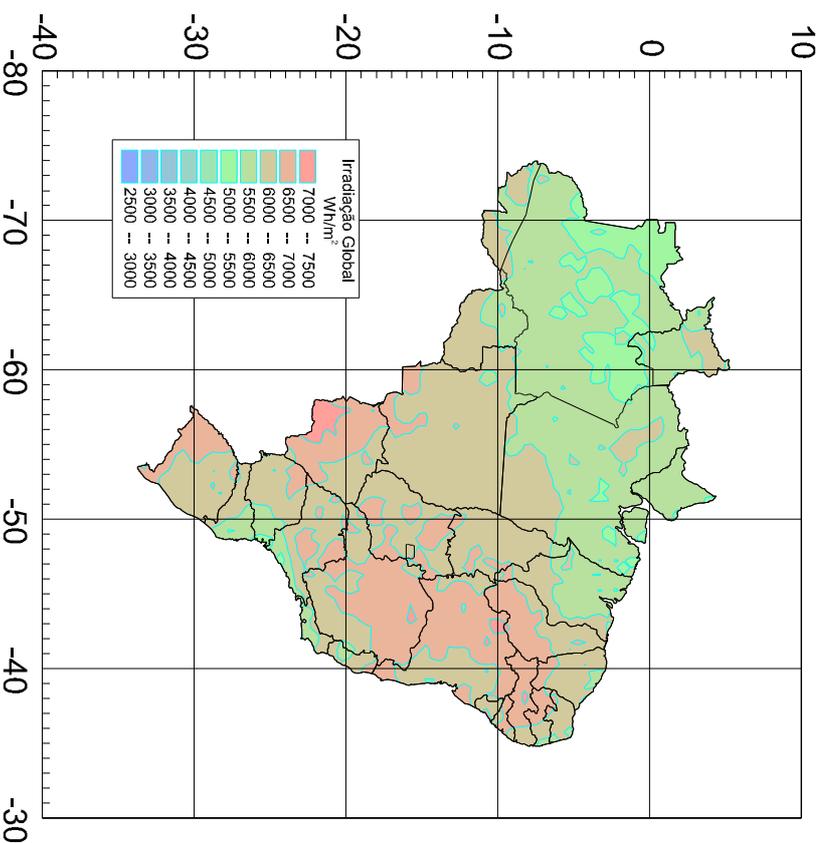


Figura 31 - Irradiação média

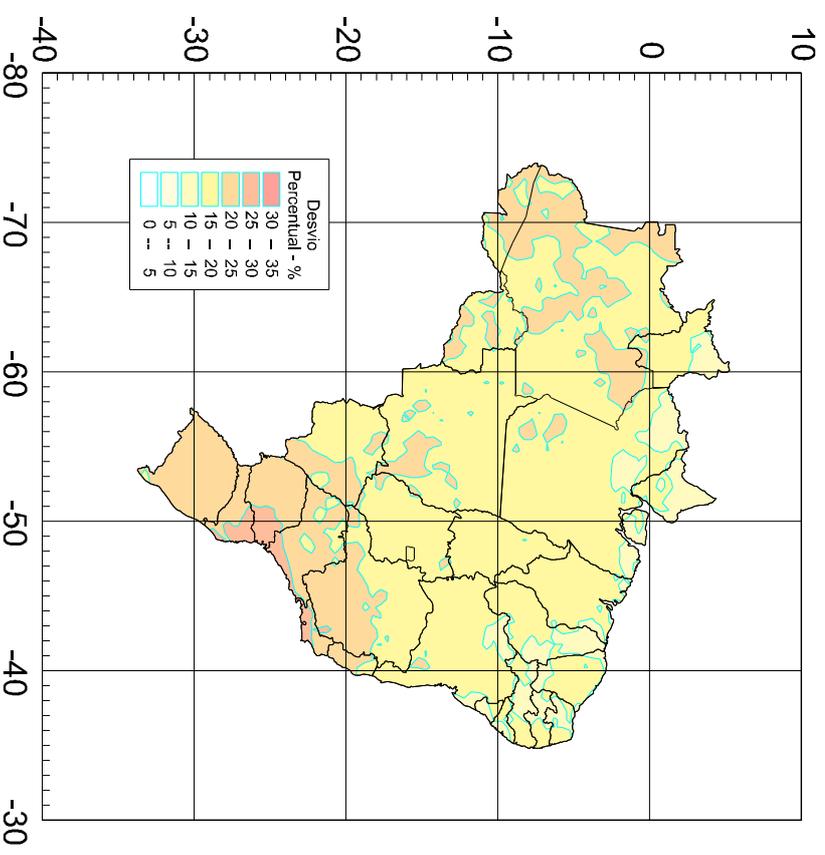


Figura 32 - Variabilidade diária no mês

MÉDIA MENSAL TÍPICA - DEZEMBRO

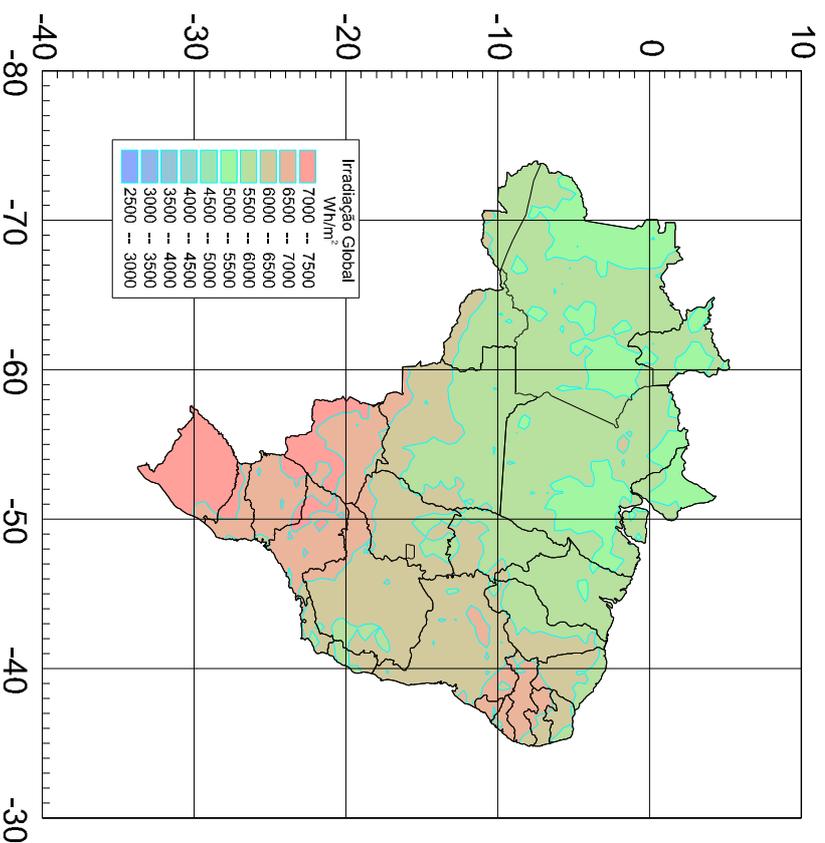


Figura 33 - Irradiação média

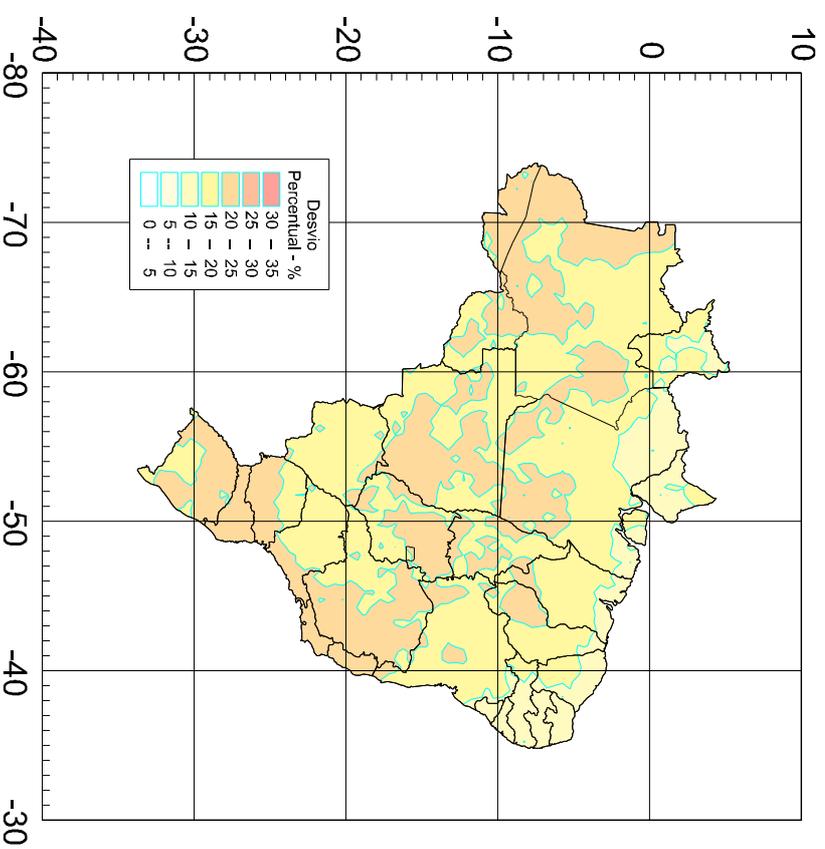


Figura 34 - Variabilidade diária no mês

## VARIAÇÃO DECENIAL DE 1985/86 E 1995/98

A variação decenal se refere ao cálculo dos desvios relativos obtidos entre a média anual do período de 1985 a 1986 e a média anual do período 1995 a 1998. O cálculo das irradiação anual dos anos 1985 a 1986 foi realizado empregando-se o modelo IGМК, versão anterior que gerou o BRAZILSR. O modelo IGМК operou com dados do satélite METEOSAT-2 (Pereira *et al.*, [25]). Este satélite, no entanto, não permitiu uma cobertura total do território nacional, o que fica evidenciado pelo corte observado nas figuras que seguem.

As figuras 36 e 37 mostram as imagens das médias anuais típicas das irradiações obtidas com dez anos de intervalo de tempo entre um e outro. As características principais de distribuição da irradiação solar no território nacional se mantêm para esses dois períodos. Contudo, o estudo da variabilidade evidencia as diferenças constantes dessas duas imagens. As diferenças são mostradas nas figuras 38 e 39.

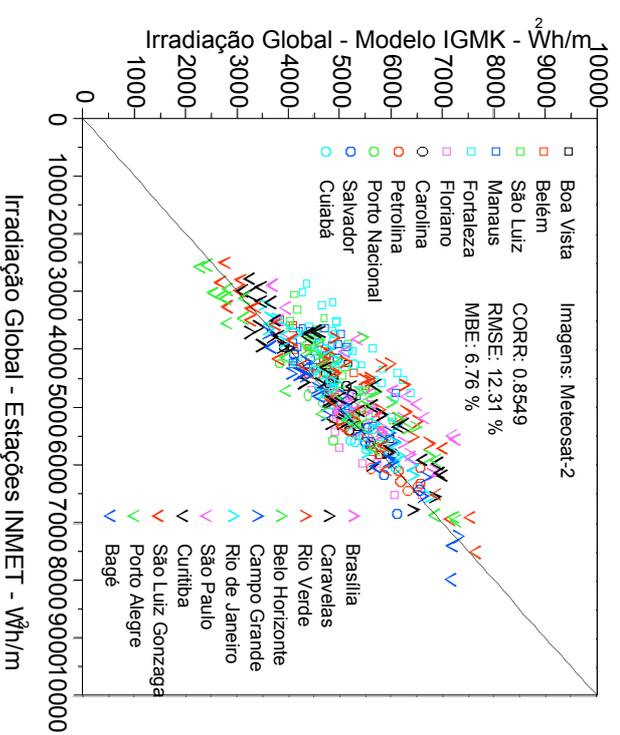


Figura 35 – Comparação dos dados calculados derivados do satélite METEOSAT-2 com dados de superfície na base mensal

### Validação dos dados computados de 1985/86

Como meta do projeto de cooperação bilateral com a Alemanha, a validação dos dados derivados do satélite METEOSAT 2 foi levada a efeito, na base mensal, contra dados coletados na rede de estações do INMET. Das vinte e duas estações então em operação, foram escolhidas como referência aquelas estações que apresentaram dados coerentes e aparentemente qualificados no período. Após uma pré seleção, vinte e duas foram selecionadas para comparação. Os resultados comparativos são apresentados na figura 35 ao lado. Uma análise detalhada desta comparação é reportada em Pereira [25]. Desta figura pode-se observar que as maiores discordâncias correspondem às capitais consideradas. Observa-se também um desvio crescente e aparentemente linear com a intensidade da irradiação. A causa desse desvio não tem uma explicação conclusiva. Por outro lado, não foi feita uma caracterização da vizinhança urbana dos locais onde essas estações estavam instaladas. Daí serem necessárias comparações adicionais futuras do modelo contra dados de estações caracterizadas.

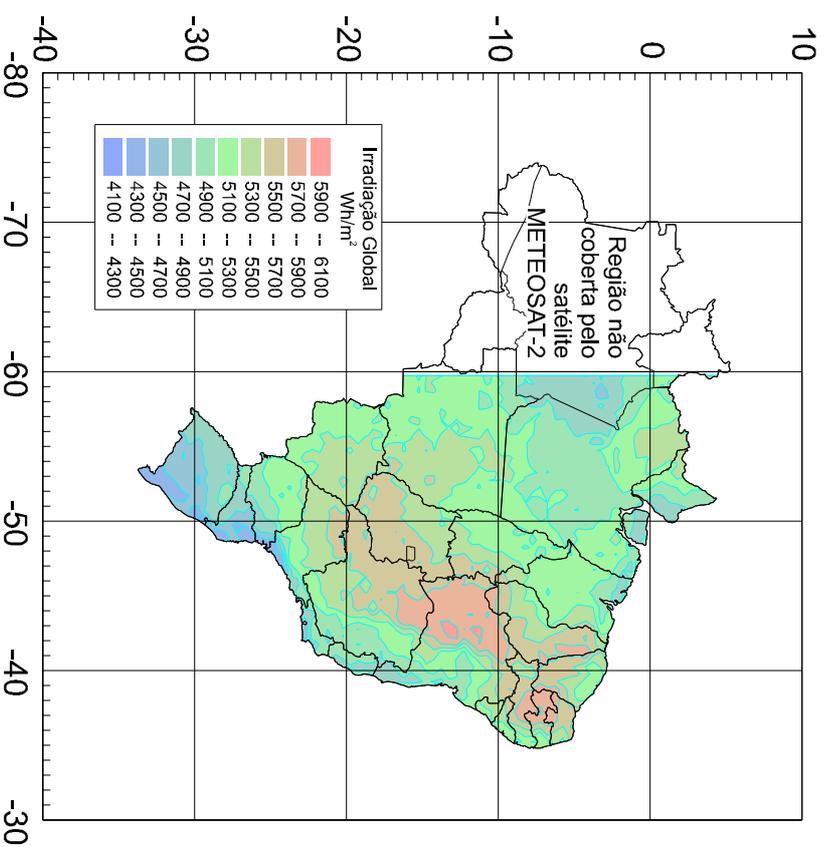


Figura 36 – Irradiação média anual típica para o período de janeiro de 1985 à dezembro de 1986 derivada do satélite METEOSAT-2

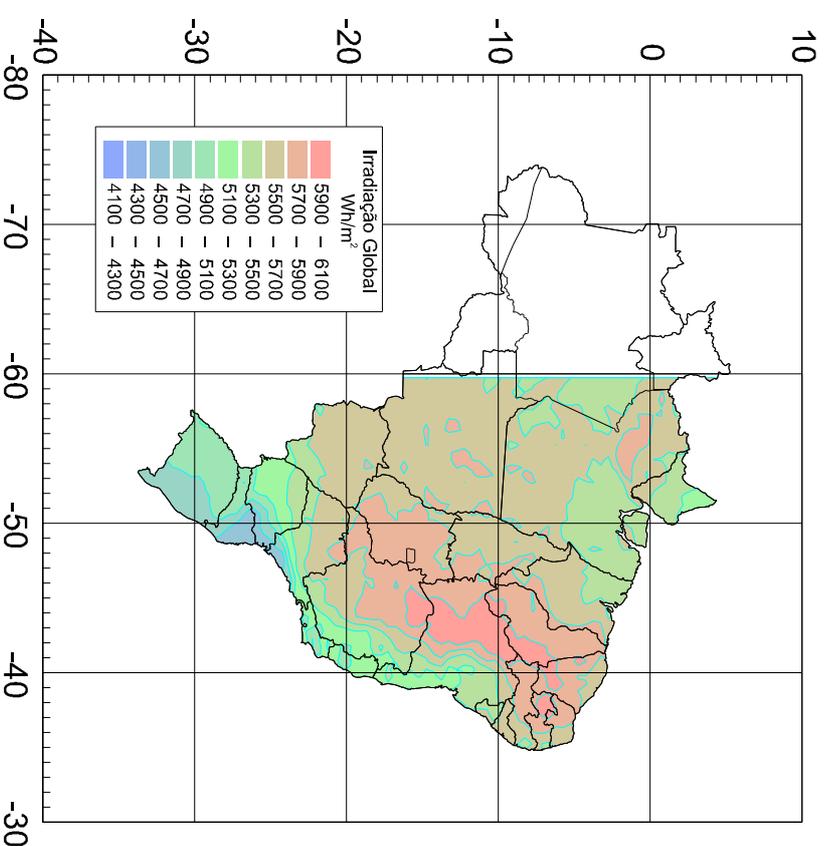


Figura 37 - Irradiação média anual típica para o período de agosto de 1995 à julho de 1998 derivada do satélite GOES-8

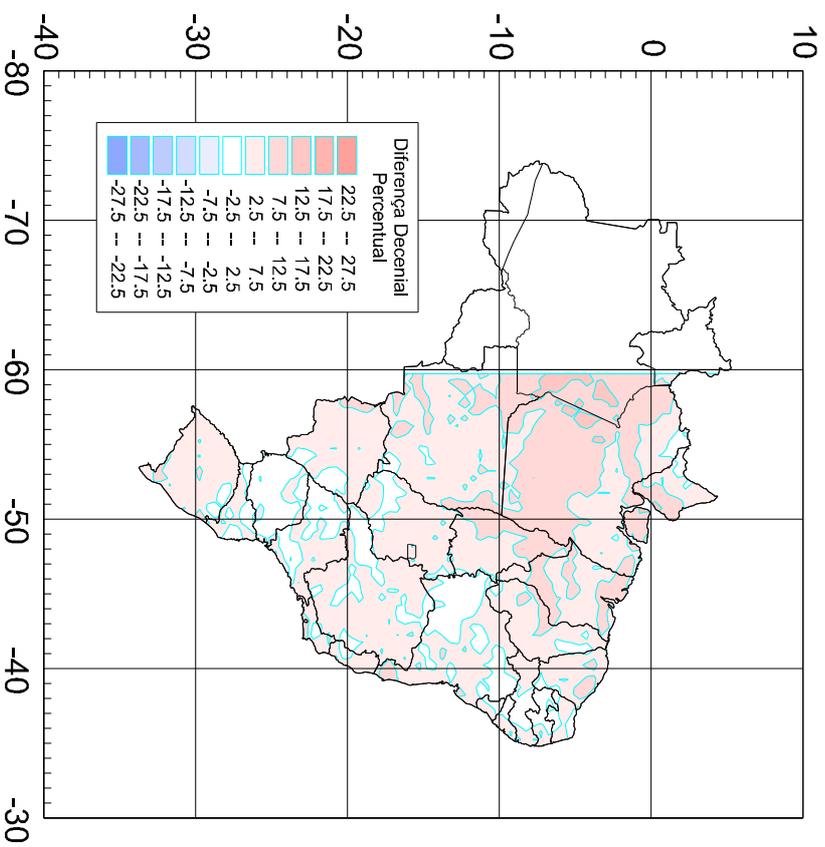


Figura 38 - Diferença percentual decenal

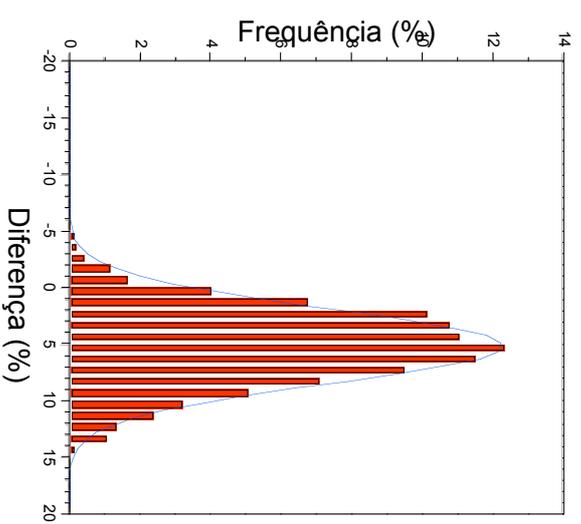


Figura 39 – Distribuição das diferenças percentuais

VARIÇÃO INTERANUAL 1996/1997

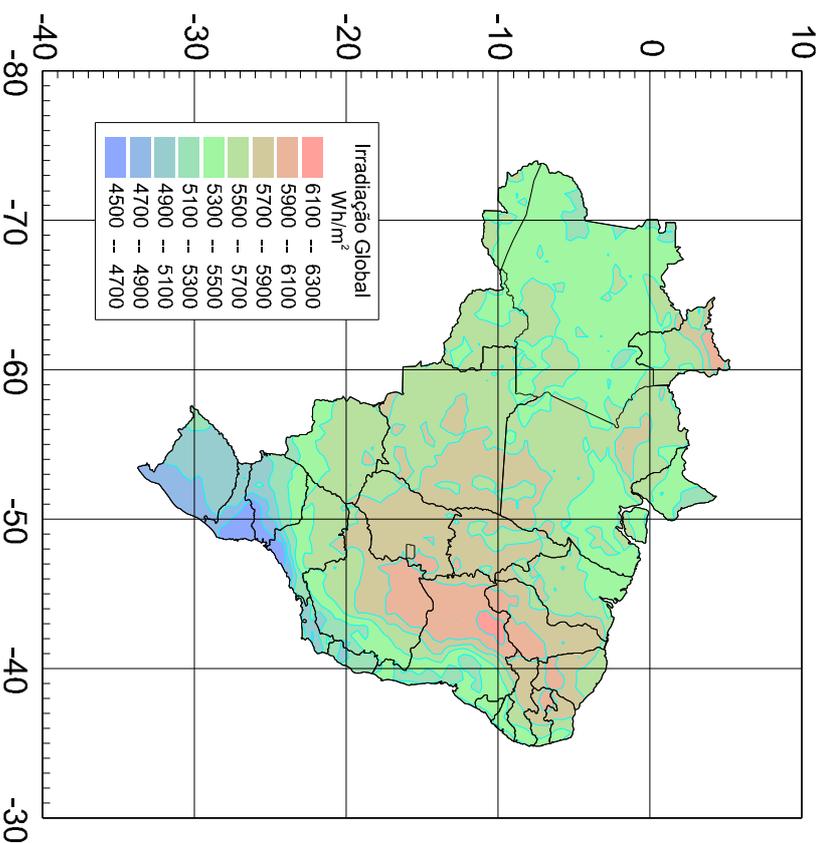


Figura 40 - Irradiação média anual - 1996

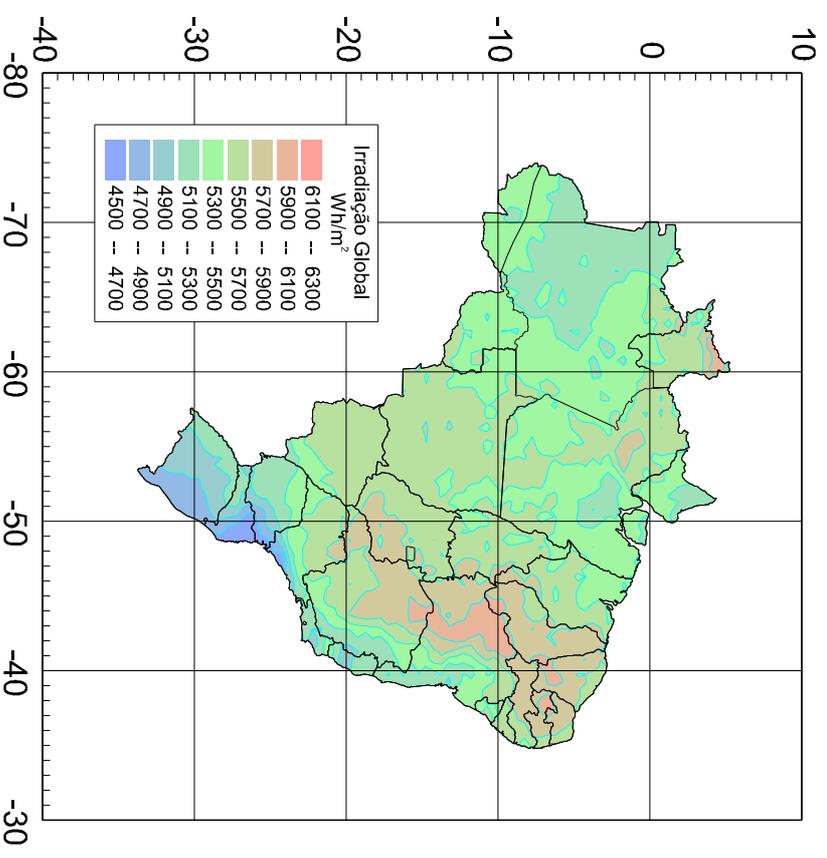


Figura 41 - Irradiação média anual - 1997

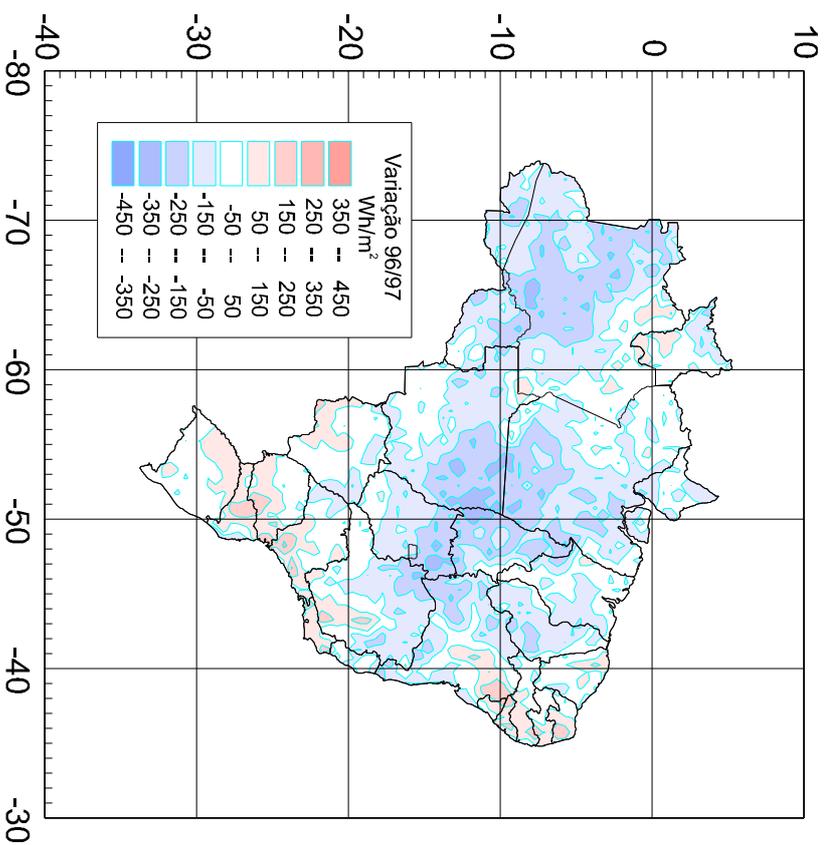


Figura 42 – Diferença absoluta interanual

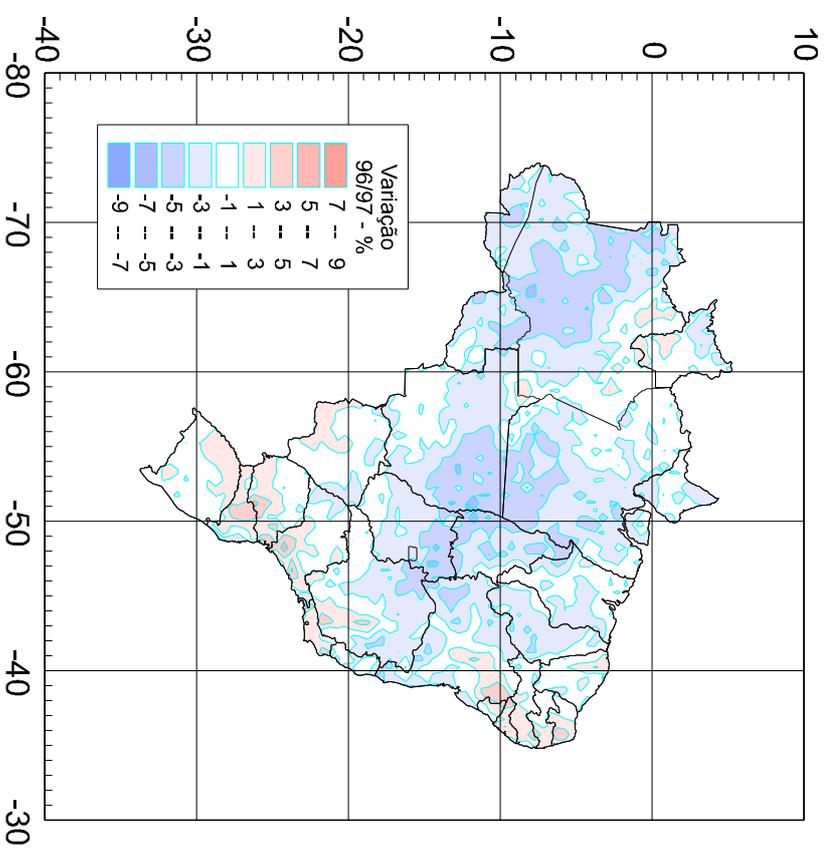


Figura 43 – Diferença percentual interanual

## IRRADIAÇÕES MÉDIAS E VARIABILIDADES REGIONAIS

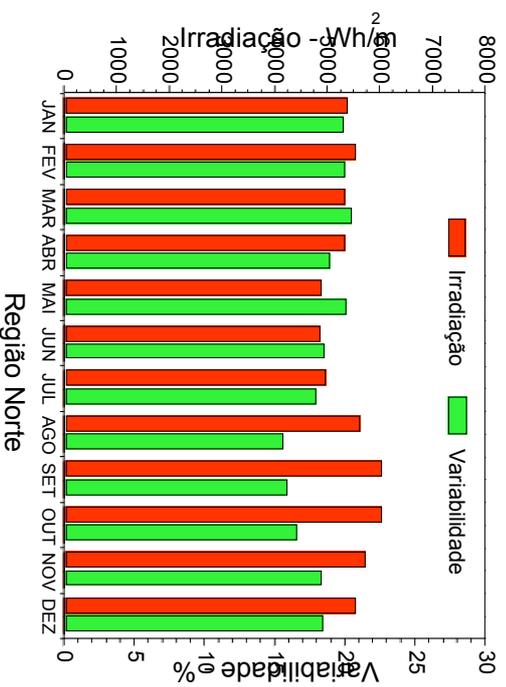


Figura 44 - Irradiação média mensal regional e variabilidade da irradiação média diária para a região norte

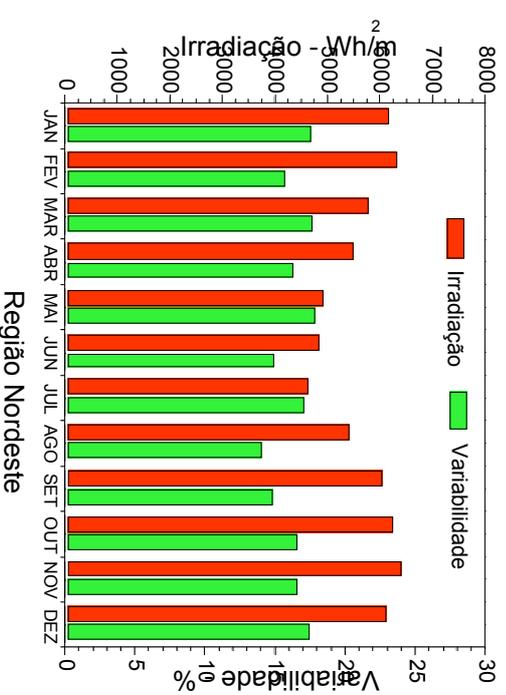


Figura 45 – Irradiação média mensal regional e variabilidade da irradiação média diária para a região nordeste

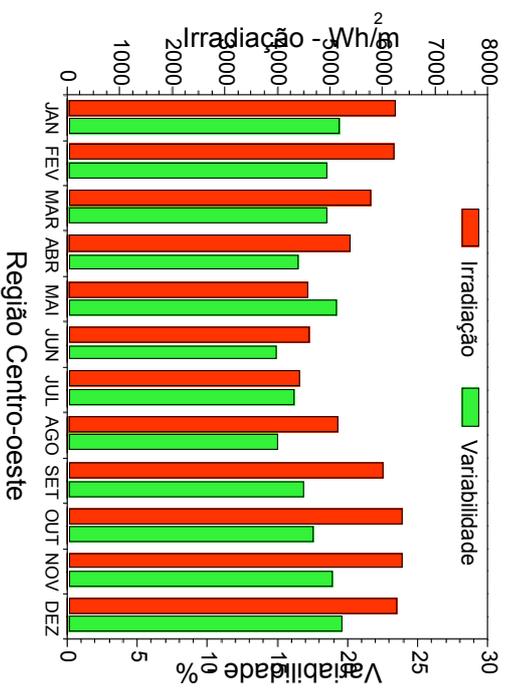


Figura 46 - Irradiação média mensal regional e variabilidade da irradiação média diária para a região centroeste

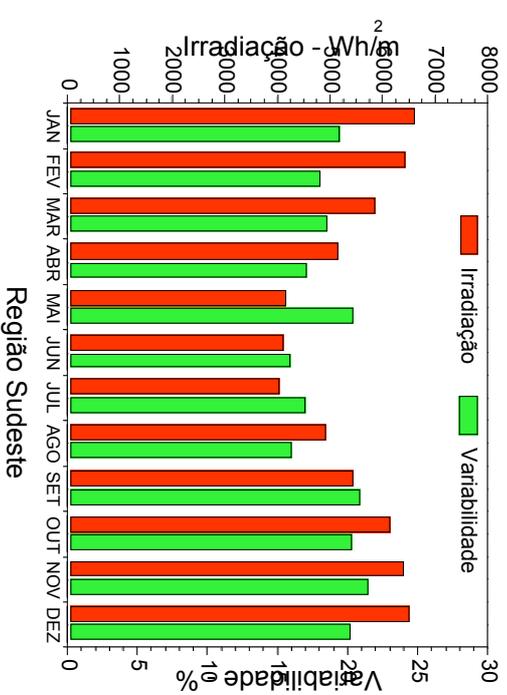


Figura 47 – Irradiação média mensal regional e variabilidade da irradiação média diária para a região sudeste

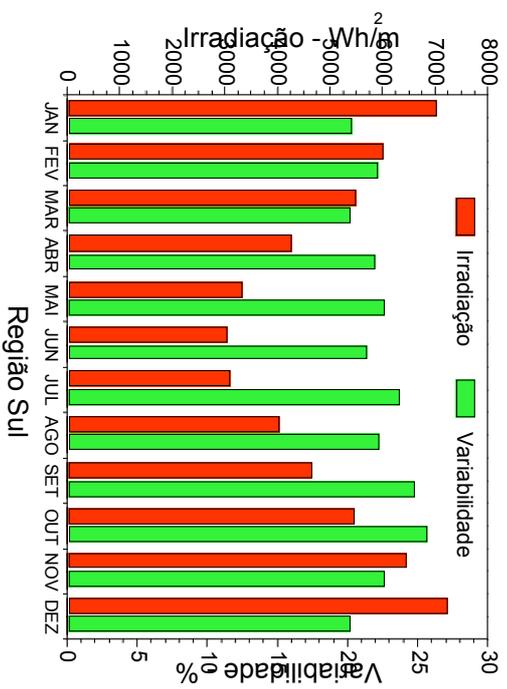


Figura 48 - Irradiação média mensal regional e variabilidade da irradiação média diária para a região sul

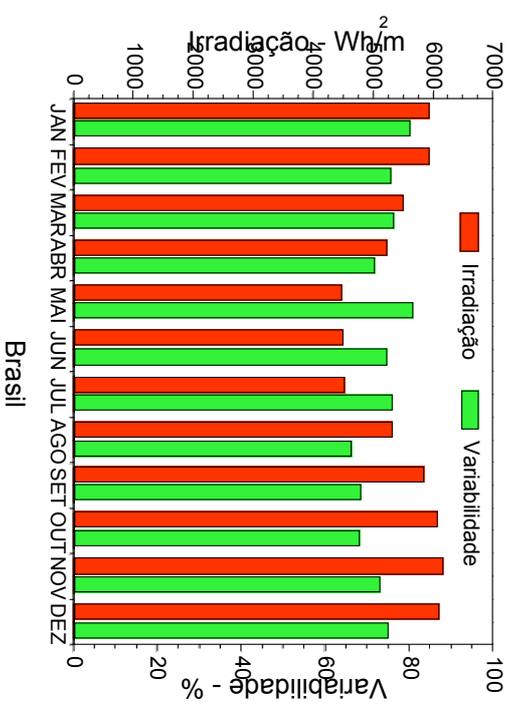


Figura 49 – Irradiação média mensal e variabilidade da irradiação média diária para todo o território nacional

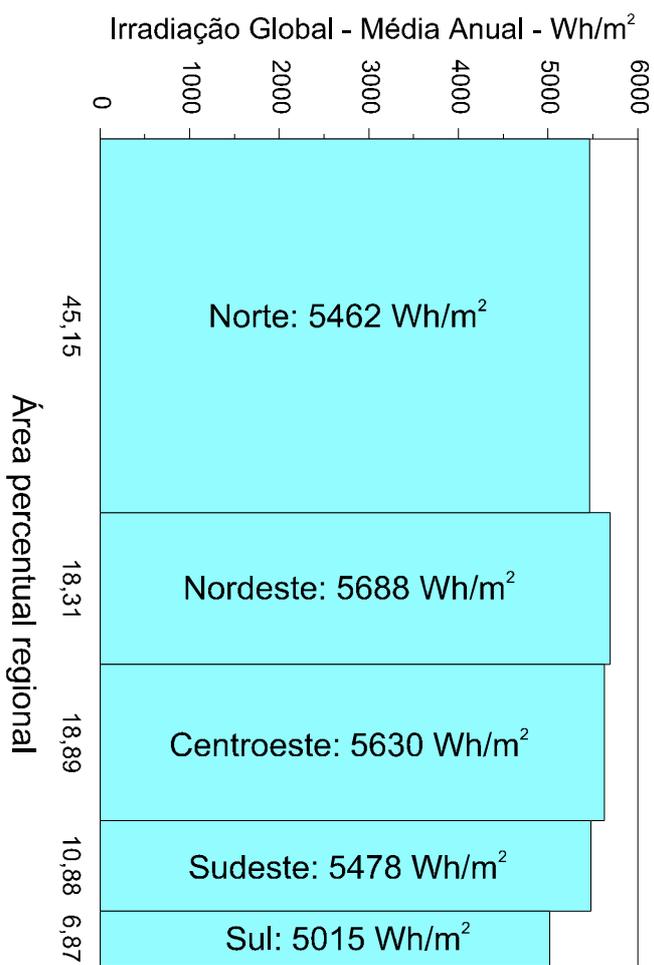


Figura 50 - Distribuição da média da irradiação global por regiões do país.

## VALIDAÇÃO DO MODELO BRAZILSR

### A - Validação do Modelo para Ceu Claro

A validação do modelo foi realizada comparando-se as estimativas do modelo com dados de piranômetros de primeira linha disponíveis no território nacional. A rede de piranômetros empregada está listada na tabela 2 que segue.

Tabela 2 - Estações radiométricas empregadas para a calibração do modelo a céu aberto.

Estação	Localização	Latitude	Longitude	Altitude (m)
BSRN Florianópolis	Santa Catarina	27.6°S	48.57°W	15
AFF Lebon Regis	Santa Catarina	26.78°S	50.71°W	1036
Mina Potosi	Rondônia	9.78°S	62.87°W	80
Reserva florestal de Jarú	Rondônia	10.08°S	61.92°W	120
Fazenda N.S. Aparecida	Rondônia	10.75°S	62.87°W	220
Fazenda Dirnona	Amazonas	2.32°S	60.32°W	120
Reserva florestal de Ducke	Amazonas	2.57°S	59.95°W	80
Fazenda Boa Sorte	Pará	5.17°S	48.75°W	170
Reserva florestal Vale do Rio Doce	Pará	5.75°S	49.17°W	150
Cuiabá	Mato Grosso	15.33°S	56.07°W	152

Inicialmente foi realizada a validação somente para os dias de céu claro (sem nuvens) para aferir e minimizar os desvios sistemáticos do modelo. A seleção dos dias de céu claro foi feita adotando-se o critério abaixo:

1. Primeiramente foram selecionadas as imagens de satélite que não apresentavam nuvens pela simples inspeção visual das mesmas.
2. Para as estações radiométrica que dispunham de medidas da radiação difusa, foi aplicado o critério do “índice de limpidez” de Liu e Jordan [22]. Assim, os dias claros foram tomados sempre que  $K = H_d / H < 0,3$  e  $K_f = H / H_o > 0,7$ , onde  $H_d$  é o total diário da radiação solar difusa,  $H$  é o total diário da radiação solar global, e  $H_o$  é o total diário da radiação extraterrestre (TOA).
3. Quando os dados de radiação difusa não eram disponíveis, o procedimento foi menos objetivo. Nesses casos, foram escolhidos os dias que apresentavam dados de superfície aparentemente sem descontinuidade visível nas curvas de irradiação horária, plotadas com intervalo de tempo de 2 minutos.

Este procedimento permitiu a seleção de 134 dias completamente de céu claro do total de dados de superfície disponíveis. As figuras 51 à 54 mostram os gráficos da validação diária obtida para céu claro.

As validações apresentadas nestas foram feitas para dados diários, visto que não houve possibilidade de utilizar os totais mensais com uma base de dados descontínua. Desta forma, o aspecto das figuras sugere uma maior dispersão. Isso é normal e esperado, e não significa necessariamente uma deficiência do modelo.

Os dados de validação com céu claro foram empregados para minimizar os desvios sistemáticos do modelo. Os dados mostrados na figura 53, obtido para as regiões Norte e Central do Brasil apresentaram dispersão superior ao da figura 51, que corresponde à região Sul. Essa maior dispersão é devida às queimadas que ocorrem nessas regiões que geram uma grande quantidade de aerossóis e gases opticamente ativos na atmosfera. Esses efeitos não são parametrizados por nenhum modelo atual de transferência radiativa e, portanto, não puderam ser incorporados nesta versão do modelo. O modelo BRAZILSR está sendo modificado para incluir esse efeito e corrigir este desvio (Pereira *et al.*, [29]).

## B - Validação do Modelo para Céu Encoberto

A validação do modelo para céu encoberto (*all sky*) são as de maior importância na avaliação de um modelo de radiação, visto que cobrem a maior parte das situações da atmosfera. Assim sendo, foram empregados somente os dados de verdade terrestre de estações radiométricas dotadas de equipamentos de primeira linha. Os dados dos piranômetros foram qualificados e integrados para uma base de tempo diária. As médias mensais desses totais diários foram então comparadas estatisticamente com os valores das médias mensais estimadas pelo modelo e os resultados são apresentados nas figuras 55 à 60. Essas figuras apresentam as estatísticas realizadas para cada horário de obtenção das imagens do satélite e dos totais diários separadamente, conforme indicado nas figuras correspondentes. Todos os dados disponíveis entre os anos de 1995 a 1998 foram empregados nesta validação.

O desvio RMSE relativo encontrado para a estação BSRN Florianópolis - SC, foi de 7,42% e o desvio sistemático MBE relativo foi de 4,02%, para um coeficiente de correlação de 0,9735. O histograma da distribuição dos desvios percentuais relativos podem ser observados na figura 56.

Os dados para a estação de AFF Lebon Regis - SC, são apresentados nas figuras 57 e 58. Esta estação, situada a mais de 1000m de altitude do nível do mar, permitiu ajustar o modelo para corrigir a variação do perfil de vapor d'água na atmosfera e, assim, minimizar os desvios sistemáticos normalmente encontrados em outros modelos para as estações de maior altitude (Gambi *et al.*, [18]). O desvio RMSE encontrado com o modelo ajustado foi de 7,64% e o desvio sistemático MBE foi de 6,04%, com coeficiente de correlação igual a 0,9802. É oportuno observar que foi constatado em 1997 que o piranômetro que mede irradiação global, por defeito no sensor comprometeu a qualidade de parte dos dados.

Para a estação BSRN Balbina – AM, o RMSE foi de apenas 4,68% enquanto que o MBE foi de -1,47%, com coeficiente de correlação igual a 0,9761. Esta estação, contudo, foi apenas recentemente instalada pelo LABSOLAR, em convênio com a WMO/BSRN e ELETROBRÁS e opera somente desde novembro de 1997.

O RMSE e o MBE foram calculados pelas equações:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_i^n (R_{SAT,j} - R_{EST,j})^2}}{\sum_i^n R_{EST,j}}$$

$$MBE = \frac{\sum_i^n (R_{SAT,j} - R_{EST,j})}{R_{EST,j}} \quad (14)$$

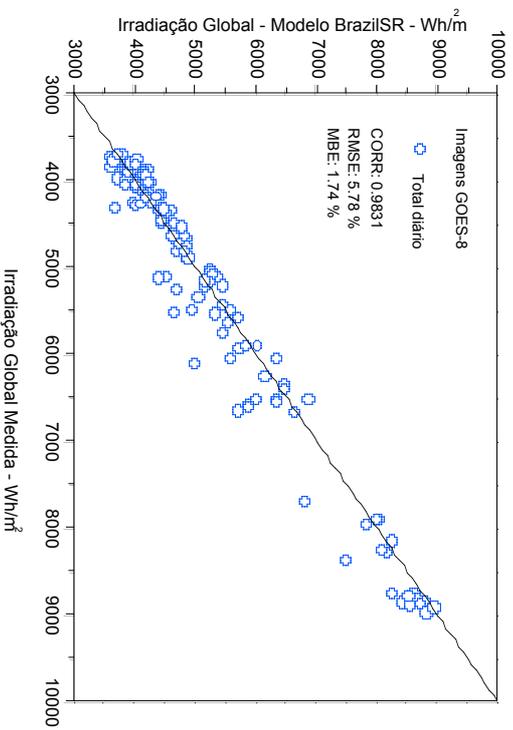


Figura 51 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados de superfície para as estações BSRN - Florianópolis e AFF - Lebon Régis para céu claro

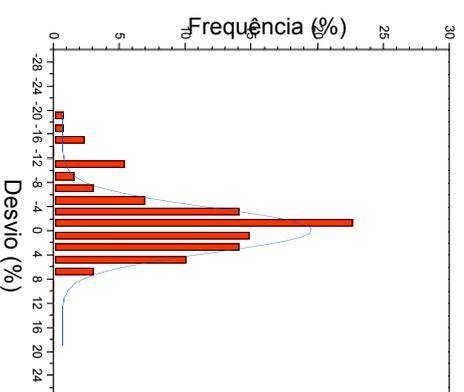


Figura 52 – Desvios da comparação entre dados derivados de satélite e dados de superfície para as estações BSRN - Florianópolis e AFF - Lebon Régis

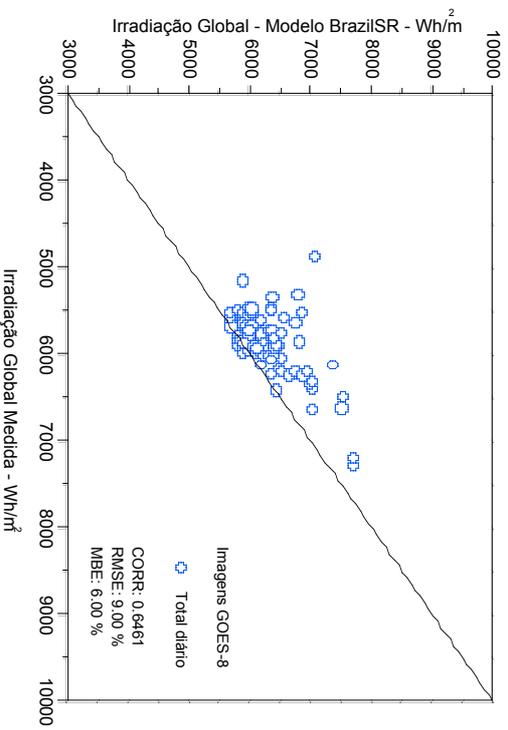


Figura 53 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados de superfície para as estações ABRACOS para céu claro

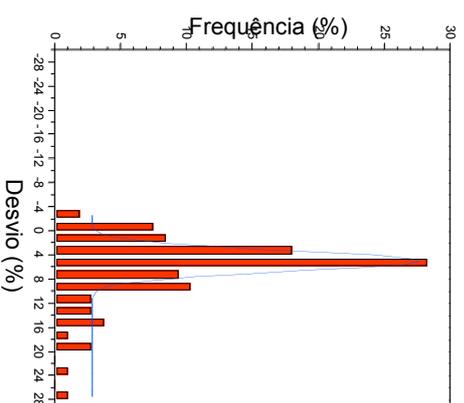


Figura 54 – Desvios percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados de superfície para as estações ABRACOS

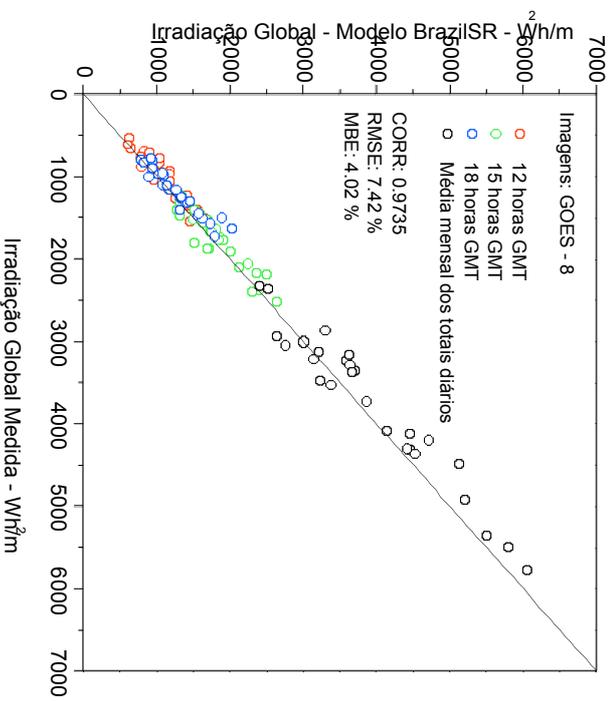


Figura 55 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados de superfície para a estação BSRN – Florianópolis, no período de agosto de 1995 à março 1998

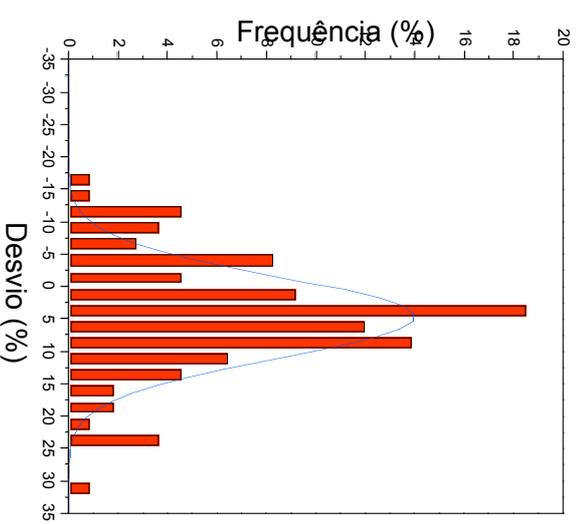


Figura 56 – Desvios percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados de superfície para a estação BSRN – Florianópolis

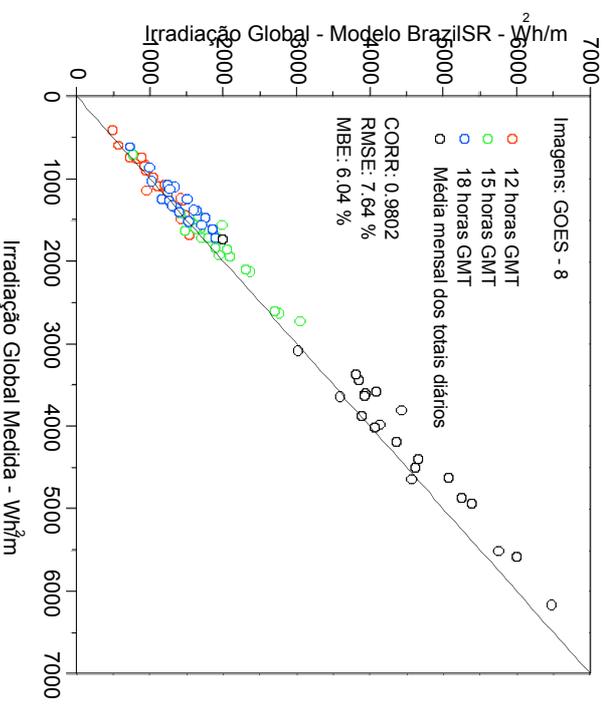


Figura 57 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados de superfície para a estação AFF - Lebon Régis, para o período de agosto de 1995 à março de 1998

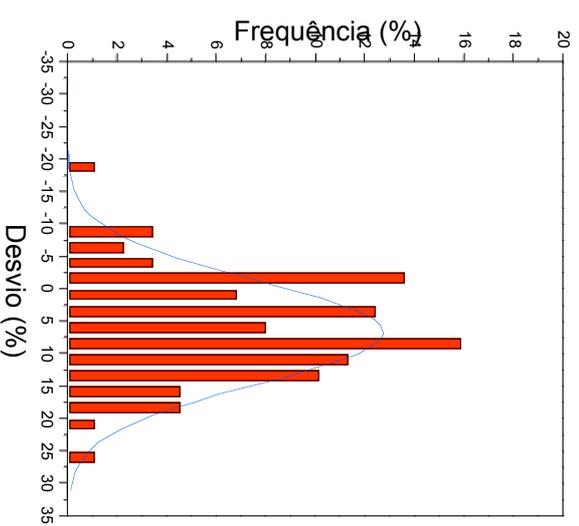


Figura 58 - Desvios percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados de superfície para a estação AFF - Lebon Régis

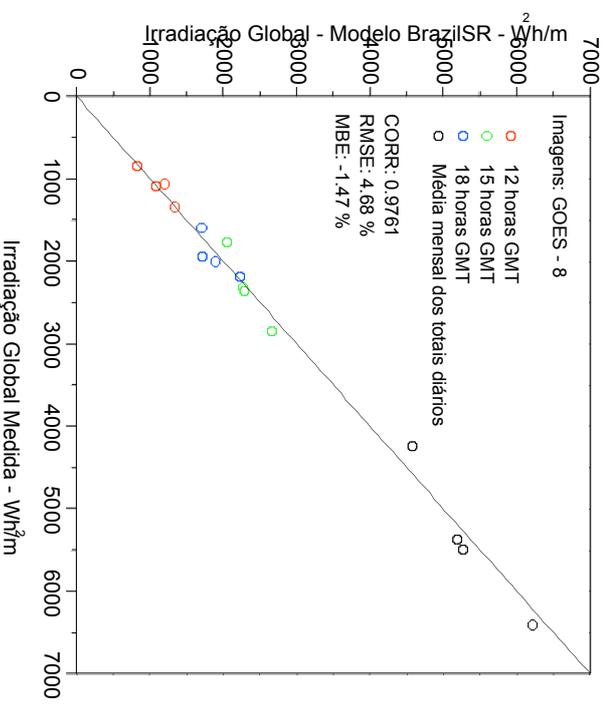


Figura 59 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados de superfície para a estação BSRN – Balbina, para o período de novembro de 1997 à fevereiro de 1998

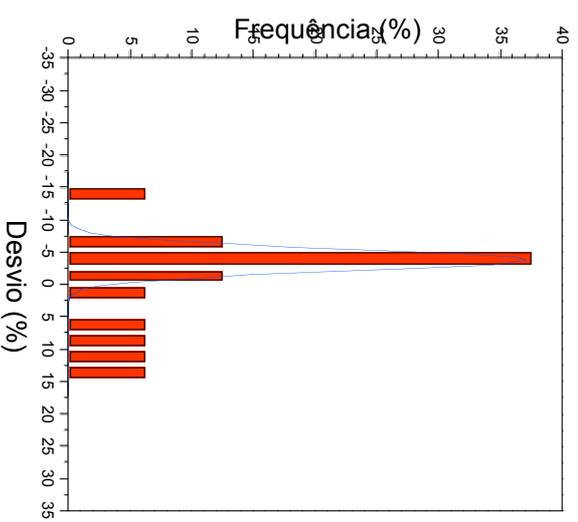


Figura 60 – Desvios percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados de superfície para a estação BSRN – Balbina

## COMPARAÇÃO DOS DADOS DO MODELO BRAZILSR E DADOS DA OLADE - ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA

Os dados da OLADE foram obtidos de publicação oficial dessa organização [11]. A publicação contém todos os dados de totais diários e médias mensais de horas de brilho solar para todas as localidades das estações de medição do INMET no país. O atlas da OLADE foi derivado pelo ajuste de dois coeficientes de Angström, únicos para todo o país, com base em dados de radiação solar medidos por piranômetros em vinte e duas estações do INMET. A distribuição de radiação solar utilizada para comparação com os dados derivados de satélite, foi obtida com o método “Kriging” de interpolação geofísica [12], a partir dos dados derivados da equação de Angström para as estações utilizadas pela OLADE. A versão do atlas da OLADE obtida pelo método kriging é portanto uma versão mais refinada que a original. Diga-se de passagem, os dados da OLADE foram editados pela universidade de Lowell e são disponíveis em [14]. A comparação foi feita para cada pixel e particularmente para os pontos das estações, evidenciando-se as capitais do país. Para tal comparação, a irradiação foi calculada pelo modelo BRAZILSR, exatamente na posição geográfica de tais estações. As imagens e diagramas a seguir ilustram as discordâncias, nas bases mensal e anual com os dados da OLADE. É oportuno mencionar, que o atlas da OLADE e similares derivados da equação de Angström, eram até a edição do presente atlas, as únicas fontes de dados consolidados disponíveis no país.

Os desvios sistemático (MBE – Mean Bias Error) e aleatório (RMSE – Root Mean Square Error) foram calculados com as equações mencionadas na seção anterior.

A diferença percentual foi calculada pela equação

$$\Delta(\%) = 100 \times \frac{R_{SAT} - R_{OLADE}}{R_{SAT}} \quad (15)$$

onde  $R$  representa a irradiação média mensal ou anual no pixel, conforme for o caso.

COMPARAÇÃO NA BASE ANUAL

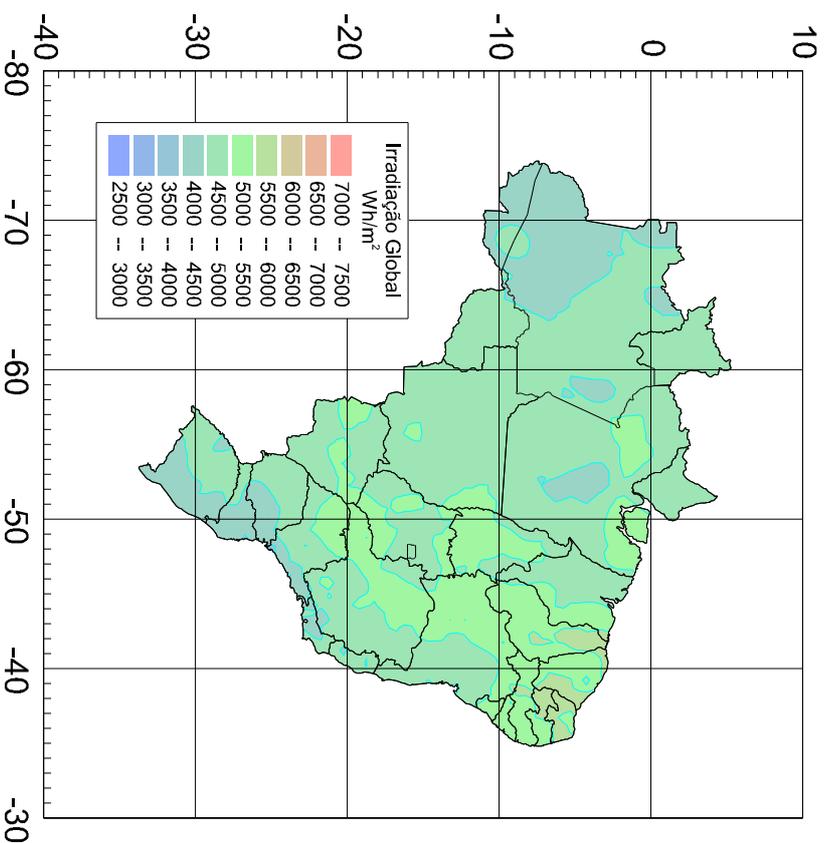


Figura 61 - Irradiação global obtida por interpolação pelo método Kriging dos dados da OLADE derivados do método de Angström

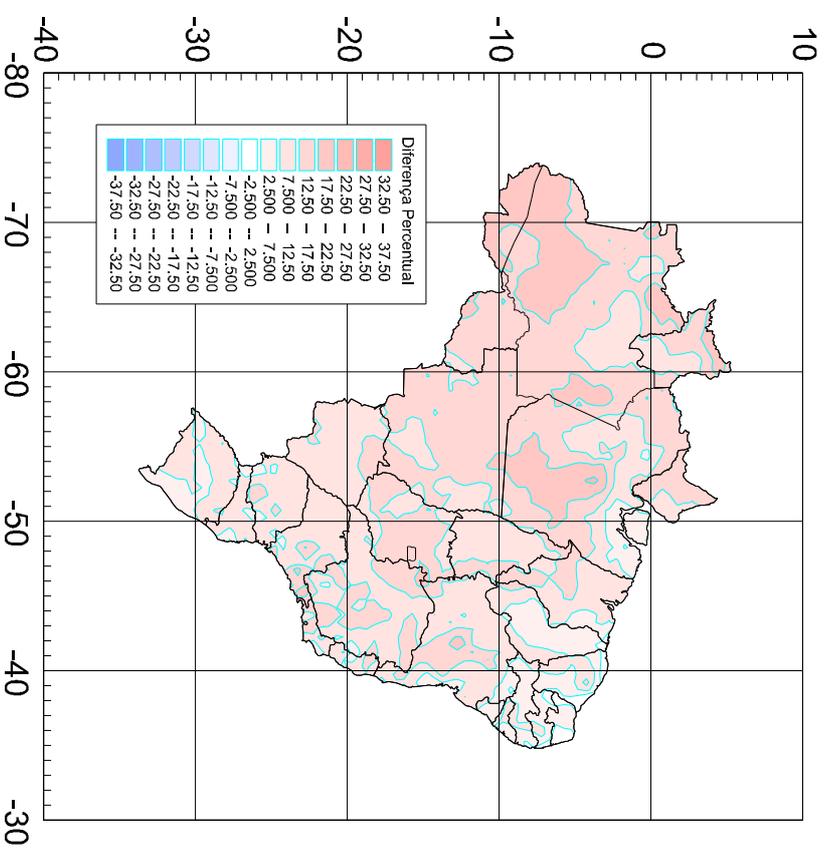


Figura 62 – Diferença percentual dos dados derivados de satélite em relação aos dados da OLADE

## COMPARAÇÃO NA BASE ANUAL

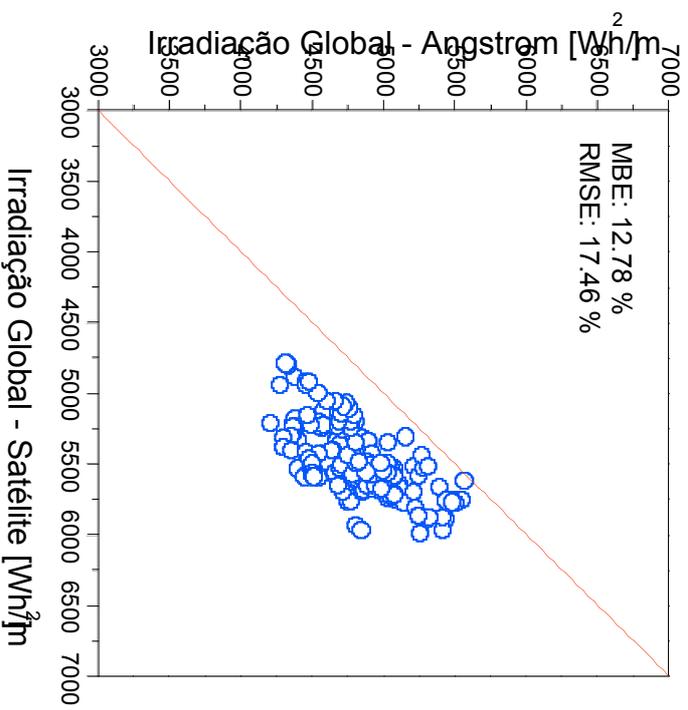


Figura 63 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados da OLADE para todo o território nacional

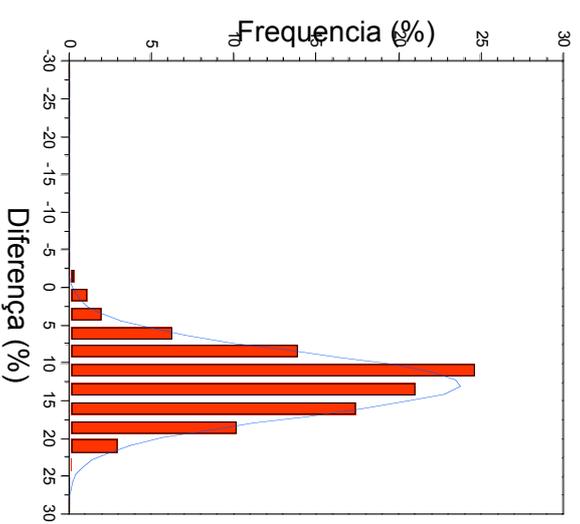


Figura 64 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - JANEIRO

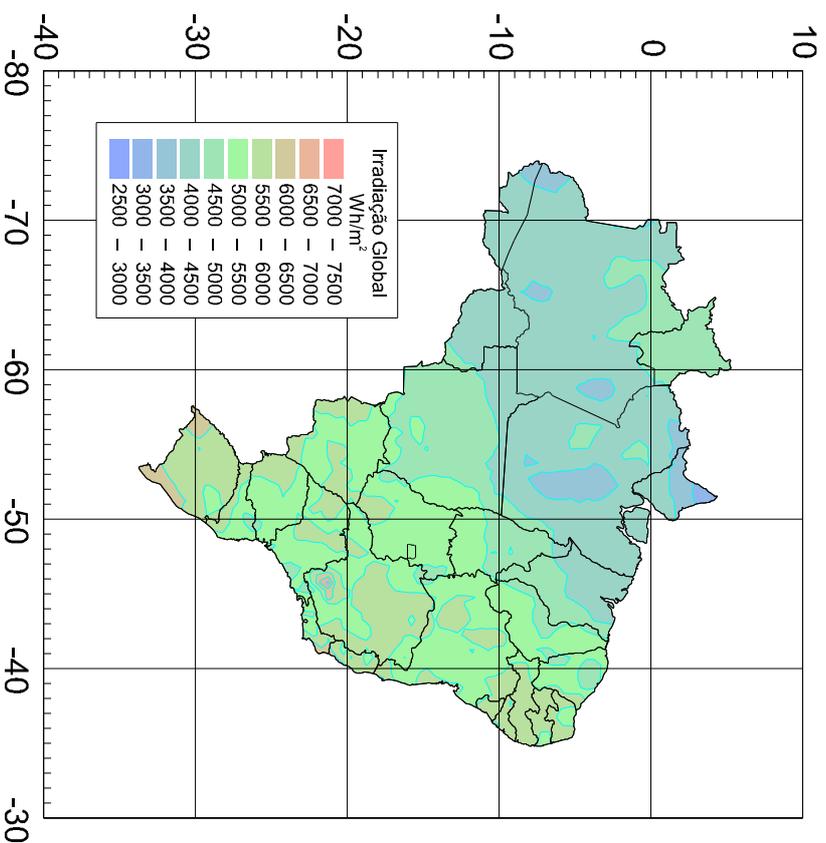


Figura 65 - Irradiação global obtida por interpolação pelo método Kriging dos dados da OLADE derivados do método de Angström

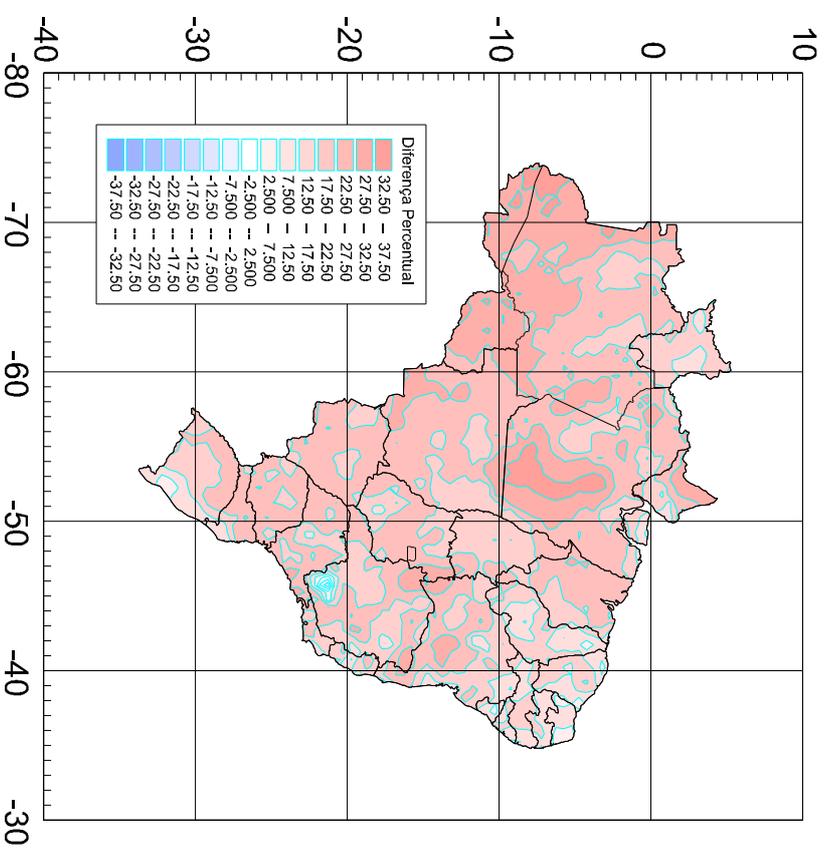


Figura 66 – Diferença percentual dos dados derivados de satélite em relação aos dados da OLADE

## COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - JANEIRO

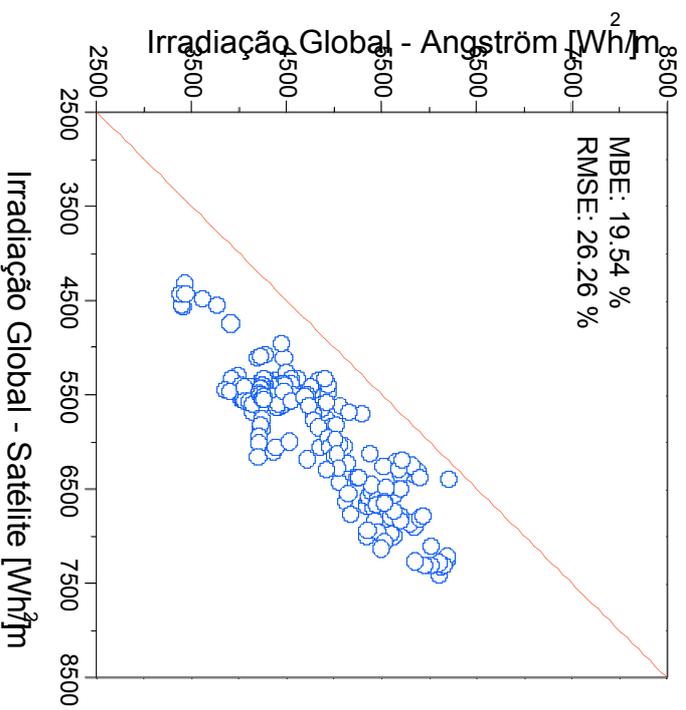


Figura 67 – Comparação dos dados derivados de satélite com dados da OLADE para todo o território nacional

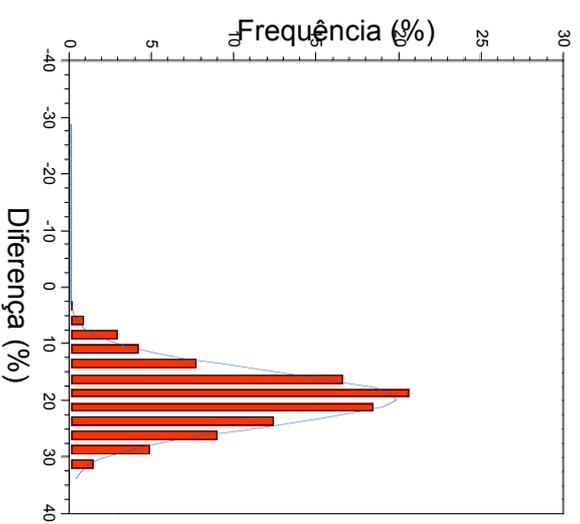


Figura 68 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - ABRIL

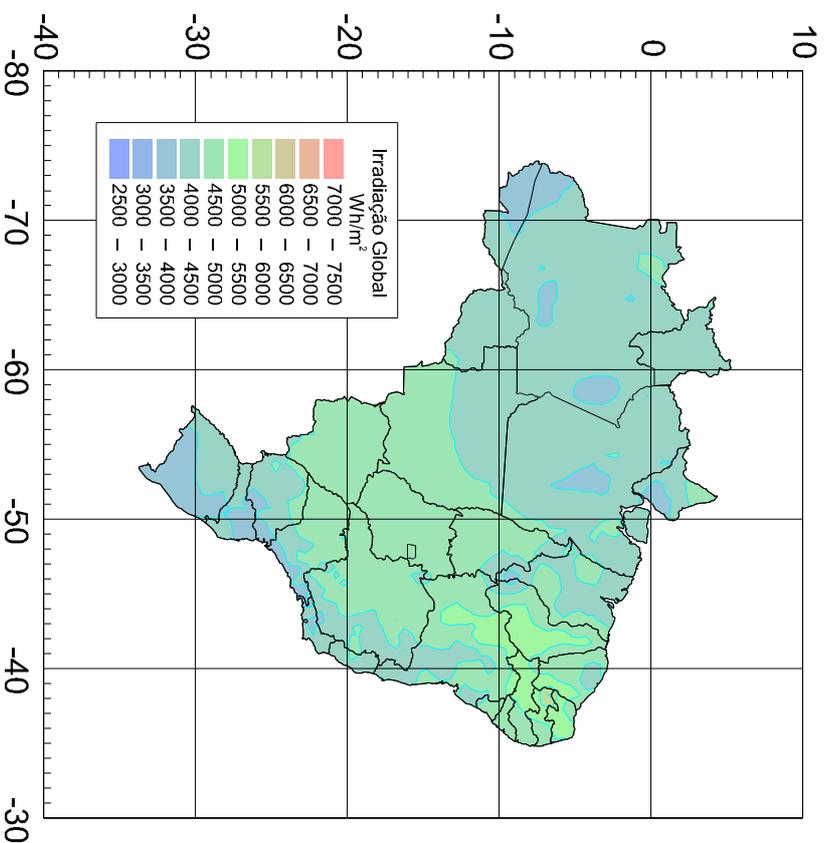


Figura 69 - Irradiação global obtida por interpolação pelo método Kriging dos dados da OLADE derivados do método de Angström

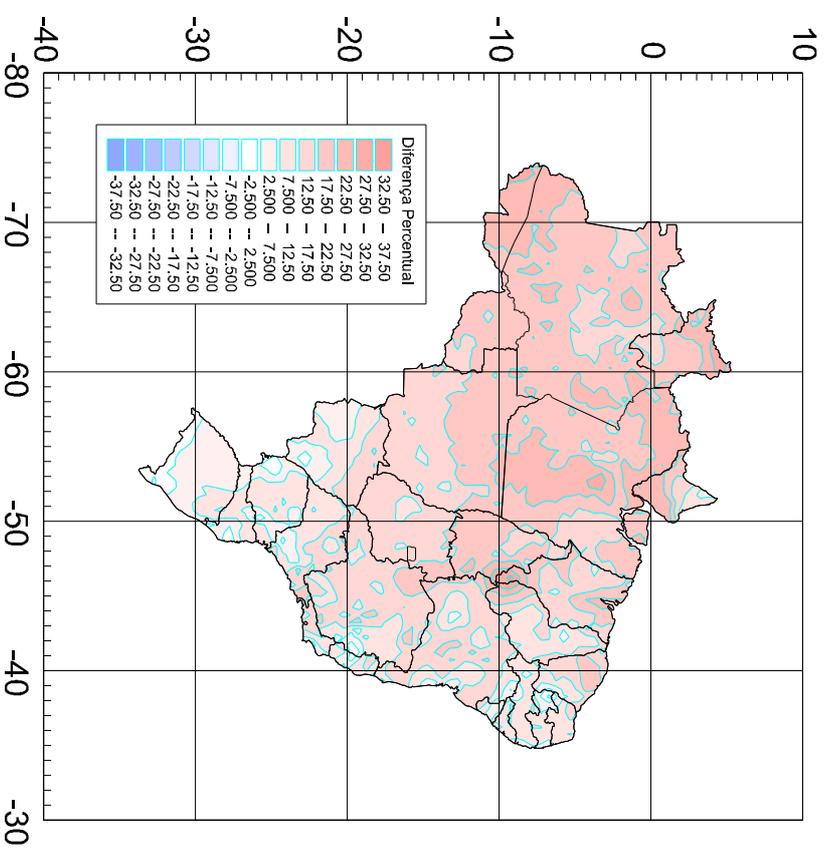


Figura 70 – Diferença percentual dos dados derivados de satélite em relação aos dados da OLADE

## COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - ABRIL

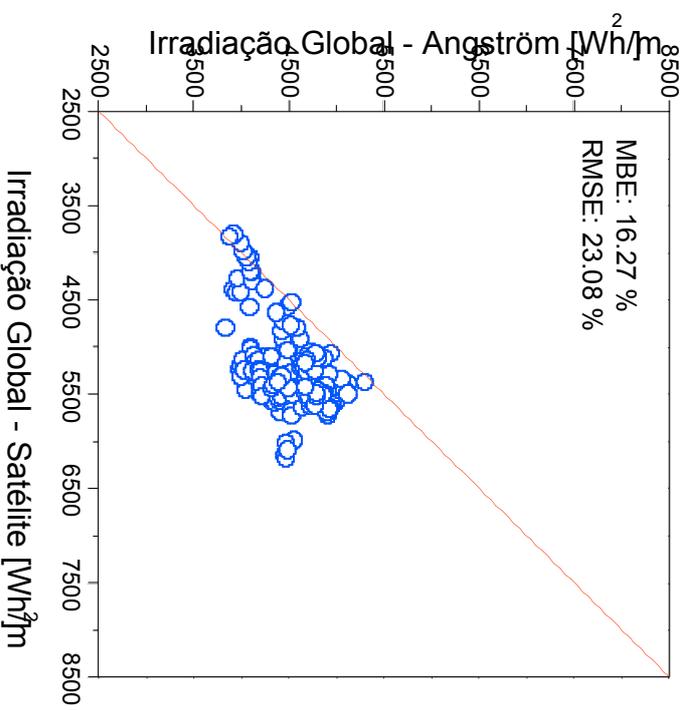


Figura 71 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados da OLADE para todo o território nacional

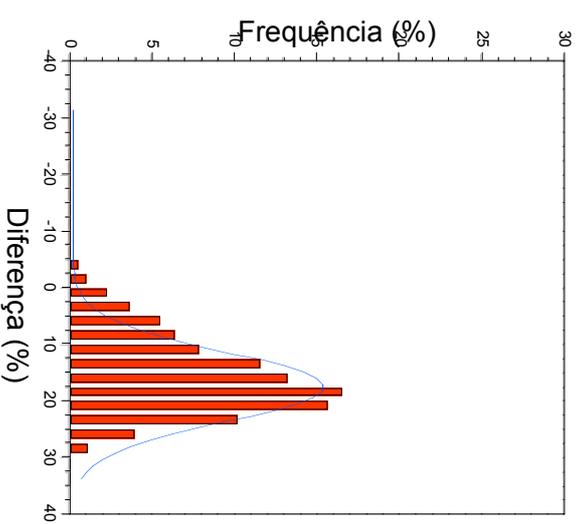


Figura 72 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - JULHO

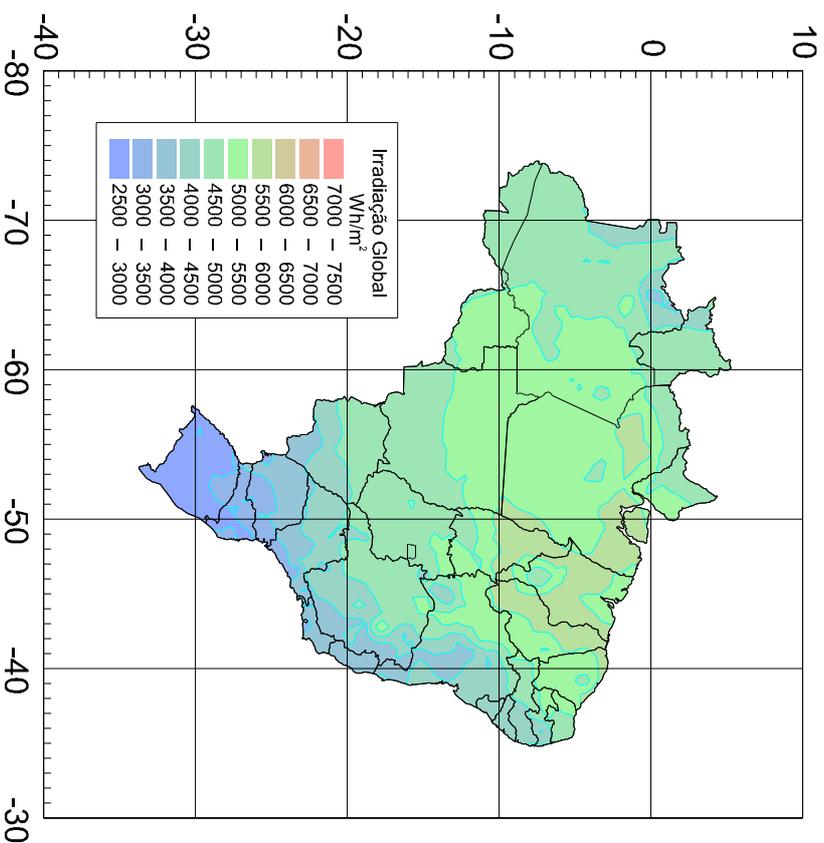


Figura 73 - Irradiação global obtida por interpolação pelo método Kriging dos dados da OLADE derivados do método de Angström

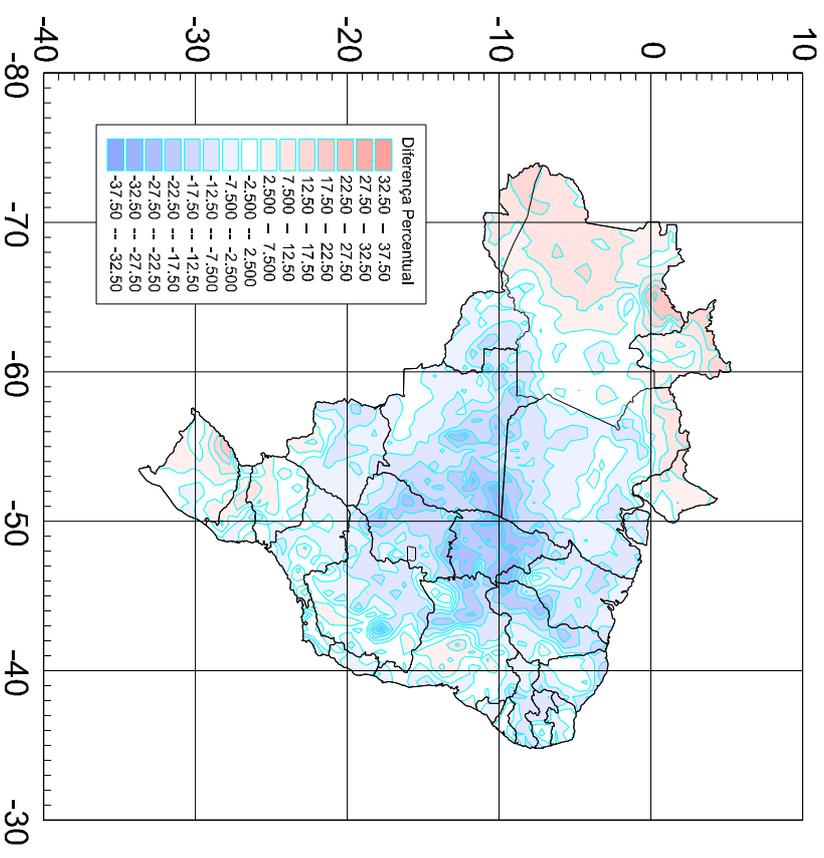


Figura 74 – Diferença percentual dos dados derivados de satélite em relação aos dados da OLADE

## COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - JULHO

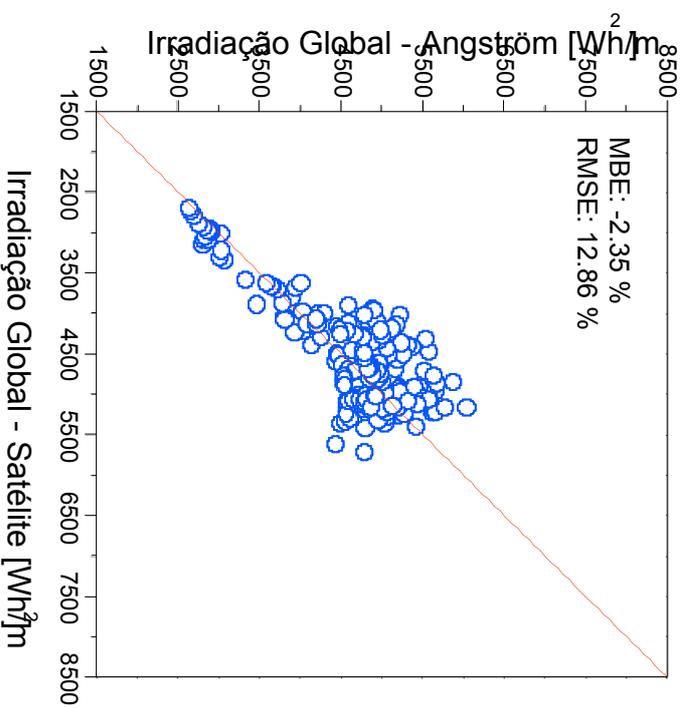


Figura 75 - Comparação dos dados derivados de satélite com dados da OLADE para todo o território nacional

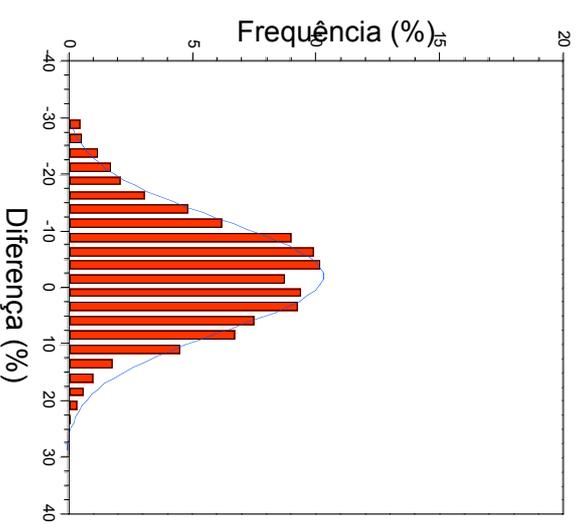


Figura 76 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - OUTUBRO

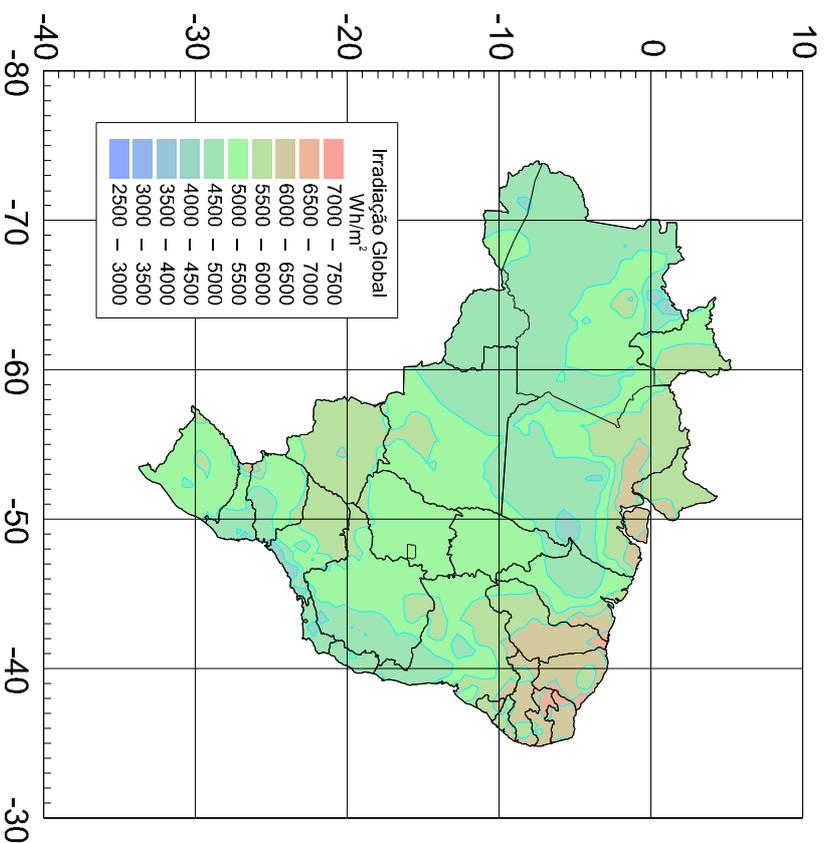


Figura 77 – Irradiação global obtida por interpolação pelo método Kriging dos dados da OLADE derivados do método de Angström

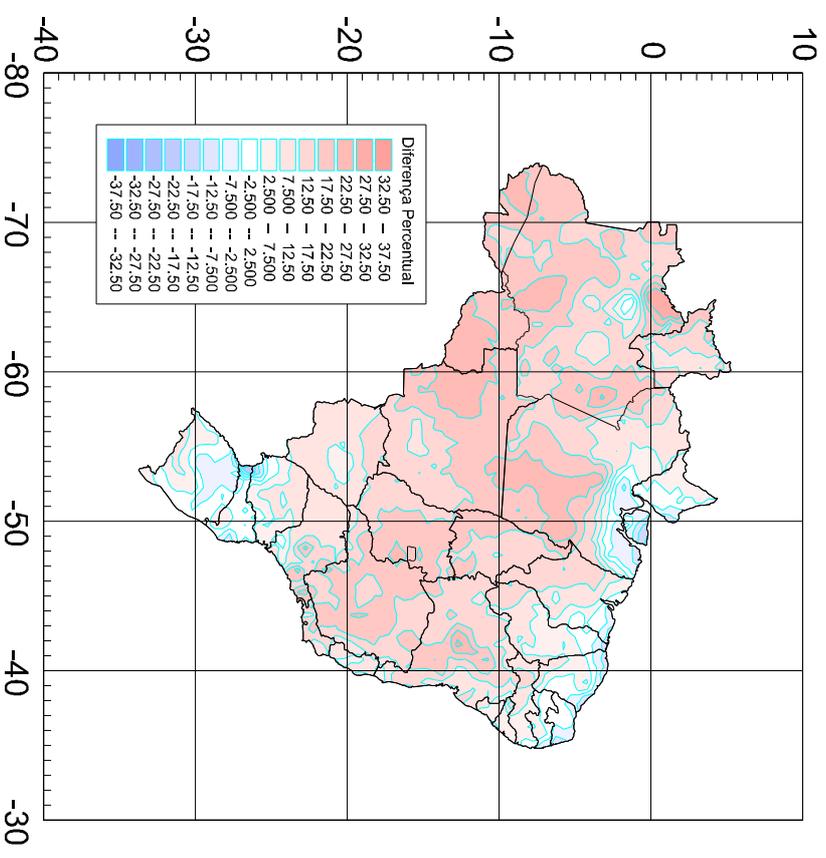


Figura 78 – Diferença percentual dos dados derivados de satélite em relação aos dados da OLADE

## COMPARAÇÃO NA BASE MENSAL - OUTUBRO

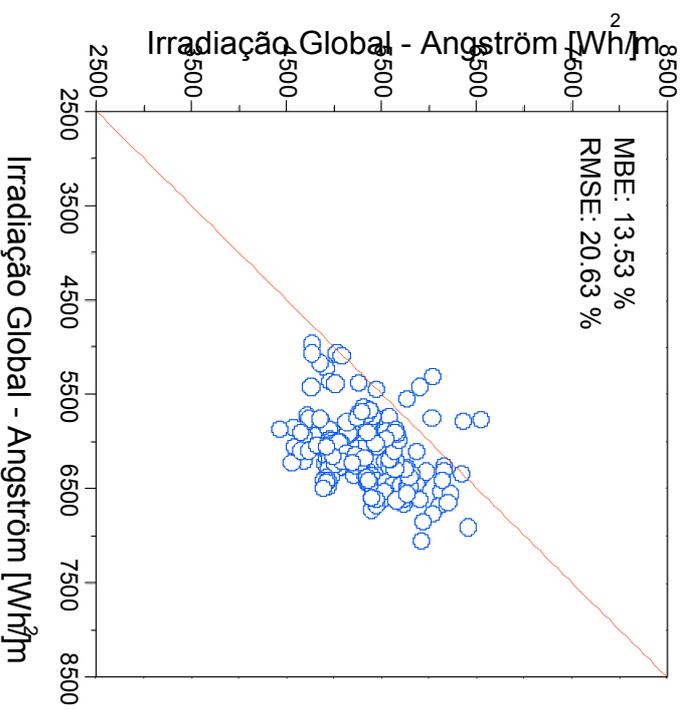


Figura 79 – Comparação dos dados derivados de satélite com dados da OLADE para todo o território nacional

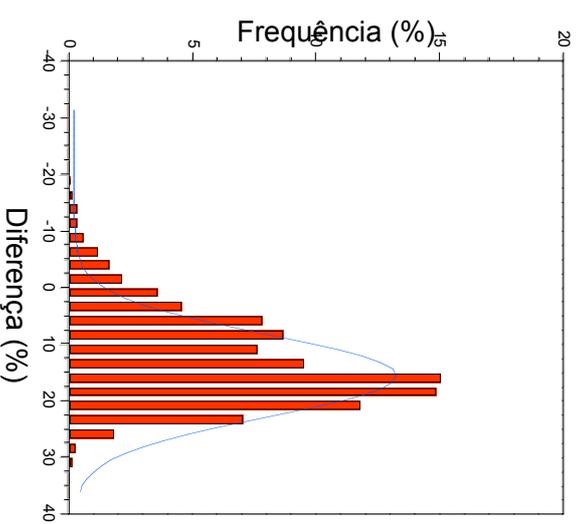


Figura 80 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

## DIFERENÇAS MENSAIS PARA AS CAPITAIS

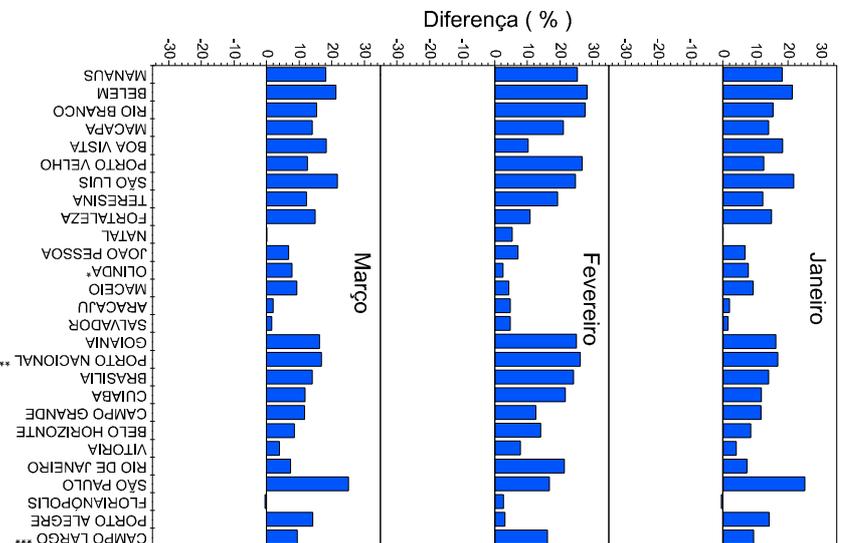


Figura 81 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

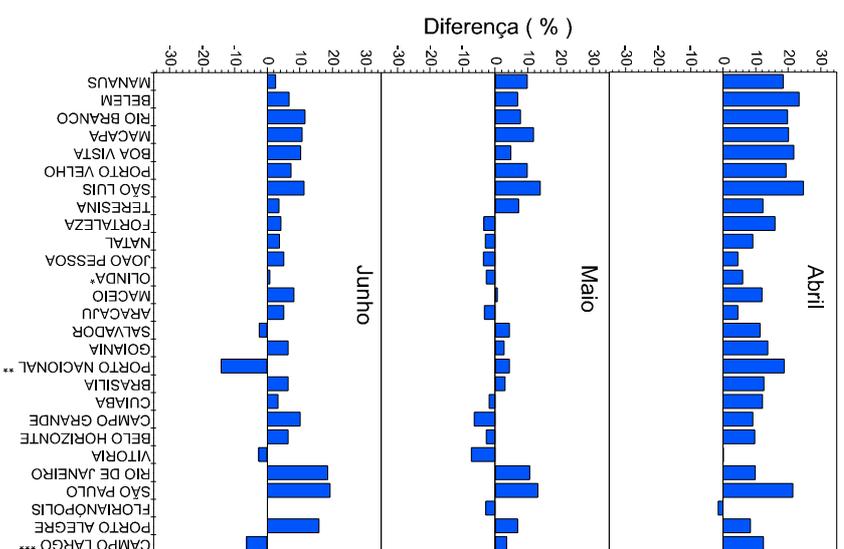


Figura 82 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

\* Estação mais próxima à Recife (PE)

\*\* Estação mais próxima à Palmas (TO)

\*\*\* Estação mais próxima à Curitiba (PR)

## DIFERENÇAS MENSAIS PARA AS CAPITAIS

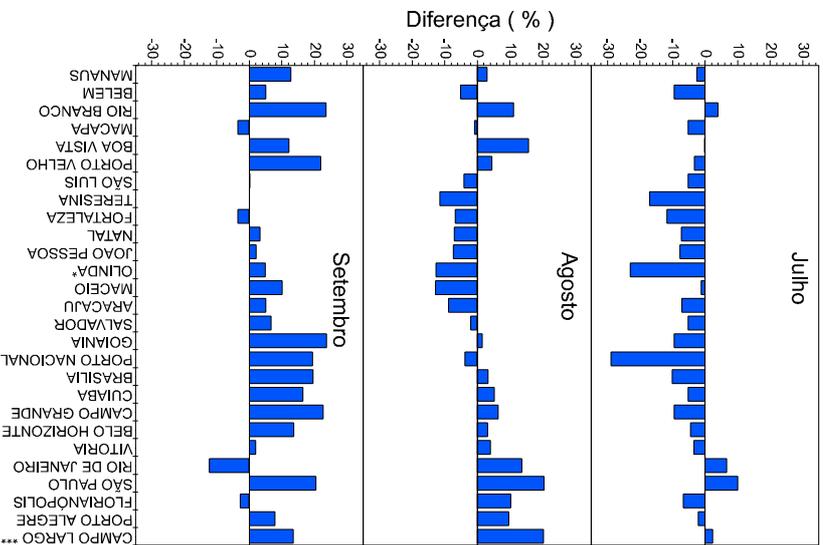


Figura 83 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

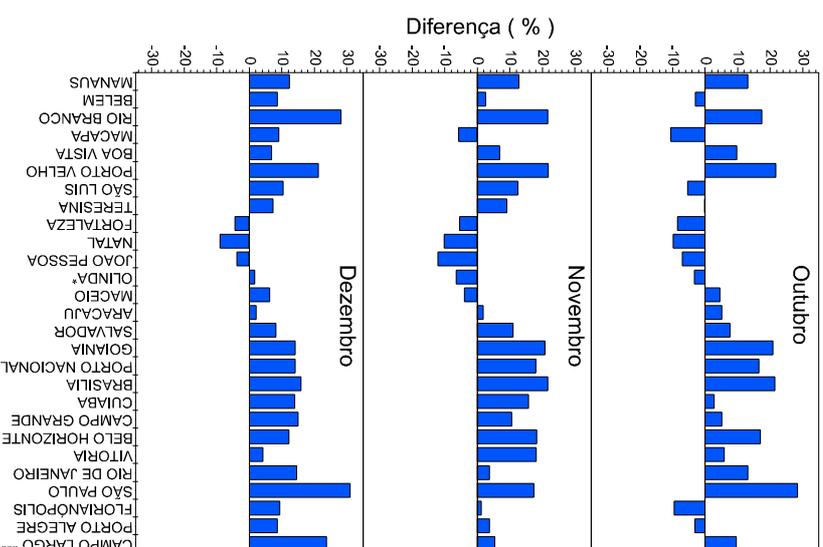


Figura 84 – Diferenças percentuais da comparação entre dados derivados de satélite e dados da OLADE

\* Estação mais próxima à Recife (PE)

\*\* Estação mais próxima à Palmas (TO)

\*\*\* Estação mais próxima à Curitiba (PR)

## CONCLUSÕES

Os dados gráficos aqui apresentados foram extraídos de um banco de dados gravados em discos óticos disponíveis no LABSOLAR. Os usuários que estiverem interessados nos dados numéricos das imagens apresentadas poderão contactar o laboratório pelo e-mail [colle@emc.ufsc.br](mailto:colle@emc.ufsc.br).

Muito embora os dados aqui apresentados possam servir de referência atual para consulta das médias diárias e mensais para qualquer ponto do território brasileiro, pode-se afirmar que tais dados não tem ainda suas estatísticas estabilizadas, uma vez que são necessários no mínimo quatorze anos para que estabilização das estatísticas climáticas [33].

Em comparação com outros países de menor dimensão geográfica, o número de estações de superfície utilizadas para comparação é extremamente limitante. Seria desejável que se desenvolvesse um trabalho de maior envergadura para comparar os dados computados futuramente, com dados de um maior número de estações qualificadas. Nessa direção, o INMET está promovendo uma reestruturação da rede de estações de superfície, na qual um número representativo de novas estações solarimétricas é considerado. Tais estações terão solarímetros de padrão de qualidade recomendados pela BSRN/WMO, os quais deverão estar enquadrados em normas ISO de fabricação e qualificação estabelecidas. A continuação do processo de comparação dos dados derivados de satélite com dados de superfície é oportuna e necessária, mesmo porque as variabilidades climáticas de grande escala e seus impactos no balanço energético na atmosfera devem ser levados em consideração, num país de reserva de biomassa monumental como o nosso. Neste sentido, o INPE e o LABSOLAR direcionaram suas atividades, para em curto espaço de tempo, incorporar no algoritmo BRAZILSR as modificações necessárias para estimar a radiação PAR (*Photochemically Active Radiation*) bem como, caracterizar e especificar os radiômetros PAR necessários para a validação. A BSRN já organizou um comitê científico na direção da execução de um programa mundial para o inventário PAR. A preservação da cobertura vegetal do planeta e a exploração da biomassa, na ótica do desenvolvimento sustentável, receberam prioridade máxima na Organização das Nações Unidas.

O levantamento da distribuição da irradiação difusa está sendo levado a efeito de duas formas independentes, a saber, pelo cálculo direto através do algoritmo BRAZILSR e pela derivação empírica, utilizando correlações entre a componente difusa, diária ou mensal, e sua correspondente componente global da irradiação. Resultados preliminares já estão sendo obtidos para o estado de Santa Catarina, no contexto de convênio presentemente em execução com a CELESC.

## AGRADECIMENTOS

A equipe técnico-científica manifesta sua perene gratidão ao Prof. Dr. E. Raschke e ao Dr. R. Stuhlmann do GKSS – Institut für Atmosphärenphysik – Geesthacht, ao Dr. F. Kasten do DWD – Deutscher Wetterdienst – Hamburg, ao Dr. K. Dehne do DWD – Potsdam pela colaboração científica e pela confiança depositada na direção da execução do presente projeto. A equipe manifesta sua gratidão também à SCI/CNPq e ao Dr. H. D. Talarek do KFA – Forschungszentrum Jülich GmbH pelo apoio logístico e à Secretaria de Desenvolvimento Científico, na pessoa do Prof. Caspar E. Stemmer, pelo suporte do MCT. Finalmente a equipe agradece a todos aqueles que em maior ou menor grau contribuíram direta ou indiretamente para o sucesso desta edição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ 1 ] – Angström, A., “*Solar and Terrestrial Radiation*”, **Quart. J. R. Meteorological Society**, Vol 50, pp. 121-128, 1924.
- [ 2 ] – Angström, A., “*On the Computation of Global Radiation from Records of Sunshine*”, **Ark. Geofisik**, Vol 2, No. 5, pp. 471-479, 1956.
- [ 3 ] – Iqbal, M., “**An Introduction to Solar Radiation**”, Academic Press, N.Y., 1983.
- [ 4 ] – Tarpley, J. D., “*Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data*”, **J. Appl. Meteorology**, Vol. 11, No. 72, pp. 1181, 1979.
- [ 5 ] – Hay, J. E. and Hansom, K. J., “*A Satellite-Based Methodology for Determining Solar Irradiance at the Ocean Surface during Gate*”, **Bull. Am. Met. Society**, Vol. 59, pp. 15-49, 1978.
- [ 6 ] – Justus, C., Paris, M. V. and Tarpley, J. D., “*Satellite Measured Insolation in United States, Mexico, and South America*”, **Remote Sensing and Environment**, Vol. 20, pp. 57-83, 1986.
- [ 7 ] – Gautier, C., Diak, G. and Masse, S., “*A Simple Physical Model to Estimate Incident Solar at the Surface from GOES Satellite Data*”, **J. Appl. Meteorology**, Vol. 19, pp. 1005-1012, 1980.
- [ 8 ] – Möser, W. and Raschke, E., “*Incident Solar Radiation over Europe Estimated from Meteosat Data*”, **J. Appl. Meteorology**, Vol. 23, pp. 166-170, 1989.
- [ 9 ] – Stuhlmann, R., Rieland, M. and Raschke, E. “*An Improvement of the IGMK Model to Derive Total and Diffuse Solar Radiation at the Surface from Satellite Data*”. **Journal of Applied Meteorology**, 29(7): 586-603, 1990.
- [ 10 ] – McArthur, L. J. B., “**BSRN Operations Manual**”, Version 1.0, WMO – Report / Workshop, Budapest, May 1998.
- [ 11 ] – OLADE, “**Atlas de Climatologia Solar**”, Vol. 2, Quito, Equador, 1987.
- [ 12 ] – Zelenka, A., Czeplak, G., D'Agostino, V., Josefsson, W., Maxwell, E., Perez, R., Noia, M., Ratto, C., and Festa, R., “*Techniques for Supplementing Solar Radiation Network Data*”, Vol. 2 – Theory, Report No. IEA-SHCT-9D-1, 1992.
- [ 13 ] – Beyer, H. G., Czeplak, G., Terzenbach, U. and Wald, L., “*Assessment of the Method used to construct Clearness Index Maps for the New European Solar Radiation Atlas (ESRA)*”, **Solar Energy**, Vol. 61, No. 6, pp. 389-397, 1997.

- [ 14 ] – University of Lowell Photovoltaic Program – “*Int. Solar Irradiation Database*”, Version 1.0, Section BRA5A-OLADE, 1987.
- [ 15 ] - Diekmann, F. J.; Raschke, E. and Woick, H. “*Operational Mapping of Global Radiation Over Central Europe*”. **Meteorologische Rundschau**, Vol. 39, No. 2, pp. 59-63, 1986.
- [ 16 ] - Diekmann, F.J., Happ, S., Rieland, M. Benesh, W., Czeplak, G. and Kasten, F., “*An Operational Estimate of Global Solar Irradiance at Ground Level from METEOSAT Data: Results from 1985 to 1987*”, **Meteorologische Rundschau**, Vol. 41, pp. 65-79, 1989.
- [ 17 ] - Gambi W., “**Avaliação de Um modelo Físico Estimador de Irradiância Solar Baseado em Satélites Geostacionários**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- [ 18 ] - Gambi, W., Pereira, E. B., Abreu, S. L., Couto, P. e Colle, S. “*Influência da Altitude e do Tamanho das Cidades nas Previsões de Irradiância do Modelo IGMK-Improved no Brasil*”, aceito para publicação em: **Revista Brasileira de Geofísica**, 1998.
- [ 19 ] - INMET, **Normais Climatológicas** (1961-1990), Departamento Nacional de Meteorologia, Brasília, BR, 1992.
- [ 20 ] - Leckner, B. “*The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface – Elements of a Model*”, **Solar Energy**, Vol. 20, No. 2, pp. 143-150, 1978.
- [ 21 ] - Lenoble, J., “**Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures**”, Hampton, A. Deepak Publishing, 420 p., 1985.
- [ 22 ] - Liu, B.Y. H., and Jordan, R.C., “*The Intercorrelation and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation*”, **Solar Energy**, Vol. 4, No. 3, pp. 1- 19, 1960.
- [ 23 ] - McClatchey, R. A., Fenn, R. W., Selby, J. E. A., Volz, F. E. and Garin, J. S., “**Optical Properties of the Atmosphere**”, Bedford, Massachusetts: Air Force Cambridge Research Laboratories, (AFCRL-72-0497), 108 p, 1972,
- [ 24 ] - Möser, W. and Raschke, E., “*Mapping of Global Radiation and of Cloudiness from METEOSAT Image Data - Theory and Ground Truth Comparisons*”, **Meteorologische Rundschau**, Vol. 36, No. 2, pp. 33-41, 1983.
- [ 25 ] - Pereira, E. B., Abreu, S.L., Stuhmann, R., Rieland, M. and Colle, S., “*Survey of the Incident Solar Radiation in Brazil by use of Meteosat Satellite Data*”, **Solar Energy**, Vol. 57, No. 2, pp. 125-132, 1996.

- [ 26 ] - Pereira, E. B., Abreu, S. L., Couto, P., Gambi, W. and Colle, S., “*Estimation of the Incidente Solar Radiation by Radiative Transfer Model During SCAR-B<sup>1</sup>, SCAR-B Proceedings*”, Translec Editorial, Edited by V. W. J. H. Kirchoff, pp. 149-152, 1996.
- [ 27 ] - Pereira, E. B., Setzer, A. W., Gerab, F., Artaxo, P. E., Pereira, M. C. and Monroe, G., “*Airborne Measurements of Aerosols from Burning Biomass in Brazil Related to the TRACE-A Experiment<sup>1</sup>*”, **Journal of Geophysical Research**, 101(D19): 23983-23992, 1996.
- [ 28 ] - Pereira, E.B. e Colle, S., “*A Energia que vem do Sol<sup>1</sup>*”, **Ciência Hoje**, Vol. 22, No. 13, pp. 24-35, 1997.
- [ 29 ] - Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S. L., Couto, P., Colle, S., and Sthulmann, R., “*Biomass Burning Controlled Modulation of the Solar Radiation in Brazil<sup>1</sup>*”, *Anais do 32nd COSPAR*, 12 a 19 de julho de 1998, Nagoia, Japão, 1998.
- [ 30 ] - Perez, R., Seals, R., Zelenka, A. “*Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data<sup>1</sup>*”, **Solar Energy**, Vol. 60, No. 2, pp. 89-96, 1997.
- [ 31 ] - Schmetz, J., “*On the Parameterization of the Radiative Properties of Broken Clouds<sup>1</sup>*”, *Tellus*, Vol. 36, pp. 417-432, 1984.
- [ 32 ] - Whitlock, C. H., Charlock, T.P., Staylor, W. F., Pinker, R. T., Laszlo, I., DiPasquale, R. C. and Ritchey, N. A., “**WRCP Surface Radiation Budget Shortwave Data Product Description - Version 1.1<sup>1</sup>**”, (NASA-TM-107747), Washington: NASA, 1993.
- [ 33 ] – Vernich, L. and Zuanni, F., “*About the Minimum Number of Years Required to Stabilize the Solar Irradiation Statistical Estimates<sup>1</sup>*”, **Solar Energy**, Vol. 57, No. 6, pp. 445-447, 1996.