



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.28.14.21-TDI

**INFLUÊNCIA DOS AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NA
QUANTIFICAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO
SOLAR: EXPERIMENTOS EM MODELO DE
TRANSFERÊNCIA RADIATIVA**

Rodrigo Santos Costa

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Enio Bueno Pereira, e Fernando Ramos Martins, aprovada em 13 de abril de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BK7PGB>>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.28.14.21-TDI

**INFLUÊNCIA DOS AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NA
QUANTIFICAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO
SOLAR: EXPERIMENTOS EM MODELO DE
TRANSFERÊNCIA RADIATIVA**

Rodrigo Santos Costa

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Enio Bueno Pereira, e Fernando Ramos Martins, aprovada em 13 de abril de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BK7PGB>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Costa, Rodrigo Santos.

C823i Influência dos aerossóis atmosféricos na quantificação do recurso energético solar: experimentos em modelo de transferência radiativa / Rodrigo Santos Costa. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxxviii + 247 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.28.14.21-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Enio Bueno Pereira, e Fernando Ramos Martins.

1. aerossóis atmosféricos. 2. energia solar. 3. modelo de transferência radiativa. 4. visibilidade horizontal. I.Título.

CDU 551.521.37

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

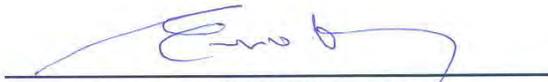
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Meteorologia

Dra. Maria Paulete Pereira Martins



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Enio Bueno Pereira



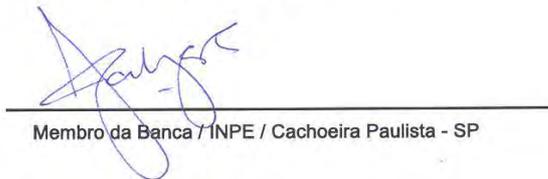
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Fernando Ramos Martins



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Juan Carlos Ceballos



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Ricardo Ruther



Convidado(a) / UFSC / Florianópolis - SC

Dr. Rodrigo Alfonso Escobar Moragas



Convidado(a) / PUC/Chile / Santiago - Chi

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

() unanimidade

Aluno (a): Rodrigo Santos Costa

São José dos Campos, 13 de abril de 2012

*“ – Oh, não... agora nunca a tiraremos de lá, lamentou Luke.
– Muita certeza você tem, disse Yoda. Para você, não poder ser feito sempre. Nunca ouvir o
que eu digo... observou novamente Yoda, em tom de repreensão.
– Mestre, levitar pedras é uma coisa... isso é muito diferente, disse Luke.
– Diferente não é. Só diferente é na sua cabeça – pondera Yoda – Desaprender o que
aprendeu precisa.
– Certo... eu tentarei – disse Luke.
– Não! Tentar não! – disse Yoda – Faça, ou não faça. Tentativa não há.”*

Star Wars Episódio V: O Império Contra-Ataca, 1980

*A meus pais, Edson Corrêa Costa (In Memoriam)
e Maria Mabel Santos Costa, por me tornarem a pessoa que sou hoje;
À Maria do Carmo Corrêa Costa (In Memoriam), pelo amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

A meus orientadores, Dr. Enio Pereira e Dr. Fernando Martins, por toda a confiança depositada, pela paciência de uma orientação à distância, pela presença e apoio sempre que precisei e pela amizade nestes anos.

À Pós-Graduação em Meteorologia, em especial à Dra. Maria Paulete, por toda a ajuda; às sempre prestativas secretárias, Lílian, Simone e Luana. À CAPES e ao CNPq (processo 141413/2007-7), pelo suporte financeiro.

À Ana Paula, minha amiga, minha confidente, minha namorada, minha noiva, minha esposa, minha mulher, meu tudo. Obrigado pela compreensão, pelo apoio, por enfrentar seus próprios problemas e por aceitar minha ausência, mesmo quando ela não era física. Amo você. Aliás, NEOQEAV!

À Minha Mãe, Maria Mabel, pelo eterno incentivo – “Felicidade é feita de força e coragem!” Aos meus irmãos, Catarina e Luiz Augusto, obrigado.

A Andrei, César, Diogo, Fernando, Lia e Uggo, amigos da Petróleo Brasileiro S.A., pelas inúmeras cessões ao longo destes anos, sem as quais este trabalho não teria sido concluído. Aos demais amigos do Oceanop, pelo incentivo.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Recursos Renováveis e Bioenergia e aos demais colegas do INPE, por fazerem que os momentos difíceis fossem, ao menos, mais divertidos. Agradecimentos especiais ao Rafael, Sheila e Jefferson.

Aos velhos e aos novos amigos em São José dos Campos, comigo em todos os momentos. Agradecimentos especiais a Virgínia, Bossa e Thiago.

E a Deus, força consciente que rege todo o Caos, por permitir que eu alcance mais este objetivo.

RESUMO

O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR é o principal recurso utilizado pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Renováveis e Bioenergia do CCST/INPE na quantificação do recurso energético solar. Porém, os aerossóis atmosféricos não são adequadamente representados, devido ao uso de valores médios mensais climatológicos de visibilidade horizontal. A parametrização desta variável foi atualizada através de duas metodologias distintas: uso da visibilidade horizontal observada em aeroportos na América do Sul e de estimativas de visibilidade horizontal realizadas através de dados de espessura óptica dos aerossóis em 550 nm, oriundas do modelo CATT-BRAMS. Como esperado, as duas bases de visibilidade horizontal apresentaram menores valores de visibilidade em setembro e maiores valores em março. A visibilidade horizontal observada originou valores médios mensais que variavam entre 13 km e 6 km, enquanto que as estimativas de visibilidade horizontal através dos dados do modelo CATT-BRAMS resultaram em valores de maior amplitude, variando entre 150 km e 3 km. Foram realizadas três simulações distintas para os meses de março, junho, setembro e dezembro dos anos de 2006, 2007 e 2008, utilizando a visibilidade horizontal original, a visibilidade observada e a visibilidade estimada, avaliando o comportamento do modelo e sua capacidade em representar a sazonalidade dos aerossóis. As simulações que utilizaram os dados de visibilidade horizontal observada em aeroportos apresentaram melhorias mais significativas nos valores das estimativas de irradiação global, com diminuições dos valores de viés que chegaram a ser da ordem de 3%, 4% e 3% para os anos de 2006, 2007 e 2008, respectivamente. Os resultados das simulações com a base de visibilidade horizontal estimada apresentaram melhor desempenho nos meses e nas regiões onde havia uma elevada carga de aerossóis, como por exemplo, a região Centro-Norte do país, no mês de setembro. Para estes casos, foram verificadas diminuições pontuais de viés e RMSE acima de 11%. Os valores das estimativas de irradiação direta e difusa também apresentaram melhorias, mas estas não foram tão efetivas quanto aquelas apresentadas na irradiação global. Apesar de serem verificadas melhorias pontuais nas estimativas de irradiação direta (9%, 8% e 5% nos anos de 2006, 2007 e 2008, respectivamente) e de irradiação difusa (17%, 12% e 15% nos anos de 2006, 2007 e 2008, respectivamente), as simulações não mantiveram a mesma consistência na diminuição do viés e do RMSE em todo o território brasileiro. Ainda assim, mesmo quando o modelo não apresentou melhorias, os valores de erro estiveram próximos àqueles obtidos nas integrações do modelo que utilizaram a visibilidade horizontal climatológica.

ATMOSPHERIC AEROSOL INFLUENCE ON SOLAR RESOURCE ASSESSMENT: EXPERIMENTS IN RADIATIVE TRANSFER MODEL

ABSTRACT

The radiative transfer model BRASIL-SR is the main resource used by the Research Group on Bioenergy and Renewable Resources of the CCST / INPE in solar energy assessment, but the atmospheric aerosols are not adequately represented due to the use of mean monthly climatological horizontal visibility. These values were updated using two different methodologies: horizontal visibility observed at airports in South America and horizontal visibility estimates performed using data from the aerosol optical thickness at 550 nm, from CATT-BRAMS model. As expected, the two sets of horizontal visibility presented lower horizontal visibility in September and highest values in March, led to the horizontal visibility observed monthly mean values ranging between 13 km and 6 km, while the estimates of horizontal visibility through data CATT-BRAMS model resulted in values of greater amplitude, which came to be the order of 3 km. We performed three different simulations for the months of March, June, September and December of years 2006, 2007 and 2008, using the original horizontal visibility, observed horizontal visibility and estimated horizontal visibility to evaluating the behavior of the model and its ability to represent the seasonal aerosols. The simulations that used the data of horizontal visibility observed at airports reported greater improvements in the values of global irradiation estimates, with decreases in the values of bias that came to be the order of 3%, 4% and 3% for the years 2006, 2007 and 2008, respectively. The simulation results with the estimated horizontal visibility performed data were better in the months and in regions where there was a high aerosol loading, for example, the central-north, in the month of September. For these cases, there were decreases off of bias and RMSE over 11%. The estimates of direct and diffuse irradiation showed improvement, but these were not as effective as those presented in the global irradiation. Although they found occasional improvements in estimates of direct irradiation (9%, 8% and 5% in the years 2006, 2007 and 2008, respectively) and diffuse irradiation (17%, 12% and 15% in the years 2006, 2007 and 2008, respectively), the simulations did not maintain the same consistency in the reduction of bias and RMSE throughout the Brazilian territory. Still, even when the model did not show improvements, the error values were close to those obtained in the model integrations using climatological horizontal visibility.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Processos de interação da radiação solar com a atmosfera e superfície terrestre.	8
Figura 2.2 – Curvas de irradiação no topo da atmosfera e na superfície terrestre em função dos comprimentos de onda.	9
Figura 2.3 – Esquema de propagação da radiação em um elemento de volume.	10
Figura 2.4 – Modas, fontes e processos de remoção dos aerossóis atmosféricos,	14
Figura 2.5 – Redução da visibilidade horizontal decorrente do aumento da espessura óptica dos aerossóis oriundos da queima de biomassa, nas cidades de Porto Velho (a) e Manaus (b).	16
Figura 2.6 – Representação dos processos envolvidos na dispersão dos aerossóis atmosféricos oriundos da queima de biomassa.	22
Figura 2.7 – Espessura óptica dos aerossóis finos (a) e grossos (b) medida pelo sensor MODIS para o mês de setembro de 2000.	24
Figura 2.8 – Profundidade óptica dos aerossóis em 550nm, para o dia 03 de setembro de 2005.	31
Figura 2.9 – Climatologia mensal da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm sobre a América do Sul, obtida a partir das medições do sensor MODIS a bordo do satélite TERRA entre os anos de 1999 e 2009.	32
Figura 2.10 – Radiômetro espectral CIMEL Eletronique 318A.	34
Figura 2.11 – Pontos de medição da rede AERONET na América do Sul.	35
Figura 3.1 – Fluxograma da preparação do arquivo de dados de entrada do modelo BRASIL-SR.	42
Figura 3.2 – Mapas de valores climatológicos de umidade relativa (%) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro(d) utilizados no modelo BRASIL-SR.	43

Figura 3.3 – Mapas de valores climatológicos de temperatura (°C) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro(d) utilizados no modelo BRASIL-SR.....	44
Figura 3.4 – Relevo utilizado no modelo BRASIL-SR.	45
Figura 3.5 – Mapas de valores climatológicos de albedo para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro(d) utilizados no modelo BRASIL-SR.	46
Figura 3.6 – Distribuição de tamanhos de gotículas tipos de nuvens parametrizados pelo BRASIL-SR.	51
Figura 3.7 – Visibilidade horizontal climatológica (em km) desenvolvida por McClatchey <i>et al.</i> (1972), para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).	54
Figura 3.8 – Resumo das parametrizações realizadas pelo modelo BRASIL-SR.	56
Figura 3.9 – Comparação da espessura óptica dos aerossóis em 550nm obtida pelo sensor MODIS e pelo modelo CATT-BRAMS.	60
Figura 3.10 – Localização das estações utilizadas na atualização da base de visibilidade horizontal a ser utilizada no modelo BRASIL-SR.....	62
Figura 3.11 – Localização das estações utilizadas nas avaliações das estimativas do modelo BRASIL-SR.....	64
Figura 4.1 – Focos de queimadas identificados no ano de 2006.	70
Figura 4.2 – Focos de queimadas identificados no ano de 2007.	73
Figura 4.3 – Focos de queimadas identificados no ano de 2008.	75
Figura 4.4 – Média mensal de visibilidade horizontal (em km), atualizada a partir dos dados de visibilidade observados em aeroportos nos anos de 2006, 2007 e 2008.	78
Figura 4.5 – Visibilidade horizontal média mensal (em km) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.....	79
Figura 4.6 – Visibilidade horizontal média mensal (em km) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.....	80

Figura 4.7 – Visibilidade horizontal média mensal (em km) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.....	82
Figura 4.8 – Visibilidade horizontal média estimada (em km) a partir da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm do modelo CATT-BRAMS para o ano de 2006, nos meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).	84
Figura 4.9 – Visibilidade horizontal média estimada (em km) a partir da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm do modelo CATT-BRAMS para o ano de 2007, nos meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).	85
Figura 4.10 – Visibilidade horizontal média estimada (em km) a partir da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm do modelo CATT-BRAMS para o ano de 2008, nos meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).	86
Figura 4.11 – Mapas de irradiação global média diária (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.	88
Figura 4.12 – Mapas de irradiação direta (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.	89
Figura 4.13 – Mapas de irradiação difusa (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.	90
Figura 4.14 – Mapas de irradiação global (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.	93

Figura 4.15 – Mapas de irradiação direta (kWh/m ²) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.....	94
Figura 4.16 – Mapas de irradiação difusa (kWh/m ²) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.....	95
Figura 4.17 – Mapas de irradiação global (kWh/m ²) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.....	98
Figura 4.18 – Mapas de irradiação direta (kWh/m ²) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.....	99
Figura 4.19 – Mapas de irradiação difusa (kWh/m ²) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.....	100
Figura 4.20 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.....	104
Figura 4.21 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.....	105
Figura 4.22 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações	

utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.	106
Figura 4.23 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.	108
Figura 4.24 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.	109
Figura 4.25 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.	110
Figura 4.26 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.	112
Figura 4.27 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.	113
Figura 4.28 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.	114
Figura 4.29 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.	118

Figura 4.30 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.	119
Figura 4.31 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.	120
Figura 4.32 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.	122
Figura 4.33 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.	123
Figura 4.34 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.	124
Figura 4.35 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.	125

Figura 4.36 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.	126
Figura 4.37 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m ²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.	127
Figura 4.38 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e Petrolina.	132
Figura 4.39 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e Petrolina.	133
Figura 4.40 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2006, nas estações de Brasília e Florianópolis.	134
Figura 4.41 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos, Palmas e Petrolina.	135
Figura 4.42 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos, Palmas e Petrolina.	136
Figura 4.43 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) em junho de 2006, em Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e São Martinho da Serra.	138

Figura 4.44 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e São Martinho da Serra.	139
Figura 4.45 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2006, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.	140
Figura 4.46 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos e São Martinho da Serra.	141
Figura 4.47 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos e São Martinho da Serra.	141
Figura 4.48 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos e São Martinho da Serra.	143
Figura 4.49 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos e São Martinho da Serra.	144
Figura 4.50 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.	145
Figura 4.51 – Correlação e valores diários de irradiação difusa estimada e irradiação difusa medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Brasília, Ourinhos e São Martinho da Serra.	146
Figura 4.52 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.	148

Figura 4.53 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra. ...	149
Figura 4.54 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Brasília e São Martinho da Serra.	150
Figura 4.55 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Brasília, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.	151
Figura 4.56 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Brasília, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.	151
Figura 4.57 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	158
Figura 4.58 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	160
Figura 4.59 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2007, nas estações de Brasília e São Martinho da Serra.	161
Figura 4.60 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.	162
Figura 4.61 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.	163

Figura 4.62 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.....	164
Continuação da figura 4.62.	165
Figura 4.63 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.....	166
Continuação da figura 4.63.	167
Figura 4.64 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2007, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.	168
Figura 4.65 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.....	169
Figura 4.66 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.....	170
Figura 4.67 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina e São Martinho da Serra.	171
Continuação da figura 4.67.	172
Figura 4.68 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina e São Martinho da Serra.....	173
Continuação da figura 4.68.	174

Figura 4.69 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Brasília e São Martinho da Serra.	175
Figura 4.70 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Natal, Ourinhos e Palmas.	175
Continuação da figura 4.70.	176
Figura 4.71 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Natal, Ourinhos e Palmas.	176
Continuação da figura 4.71.	177
Figura 4.72 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.	178
Figura 4.73 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.	179
Figura 4.74 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2007, na estação de São Martinho da Serra.	180
Figura 4.75 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) em dezembro de 2007, em Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.	180
Continuação da figura 4.75.	181
Figura 4.76 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2007, nas estações de Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.	181

Figura 4.77 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	187
Continuação da figura 4.77.	188
Figura 4.78 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	188
Continuação da figura 4.78.	189
Figura 4.79 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2008, nas estações de Petrolina e São Martinho da Serra.	190
Figura 4.80 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	191
Continuação da figura 4.80.	192
Figura 4.81 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de março de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.....	192
Continuação da figura 4.81.	193
Figura 4.82 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	194
Figura 4.83 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	195

Figura 4.84 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2008, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.	196
Figura 4.85 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.....	197
Figura 4.86 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de junho de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	198
Figura 4.87 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	199
Continuação da figura 4.87.	200
Figura 4.88 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.....	200
Continuação da figura 4.88.	201
Figura 4.89 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Brasília, Petrolina e São Martinho da Serra.	202
Figura 4.90 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.....	203
Figura 4.91 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.	204

Figura 4.92 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.	205
Continuação da figura 4.91.	206
Figura 4.93 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) em dezembro de 2008, em Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.	206
Continuação da figura 4.92.	207
Figura 4.94 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Petrolina e São Martinho da Serra.	207
Figura 4.95 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	208
Figura 4.96 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m ²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.	209

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Modelos básicos de aerossóis propostos pelo <i>Standard Radiation Atmosphere</i>	25
Tabela 2.2 – Características dos perfis verticais de aerossóis propostos para atmosfera padrão	26
Tabela 2.3 – Modelos de aerossóis utilizados para determinação das propriedades óticas de aerossóis.....	27
Tabela 2.4 – Parâmetros óticos de aerossóis em plumas regionais na região de queimadas.....	28
Tabela 3.1 – Coordenadas das estações utilizadas nas avaliações das estimativas.	65
Tabela 4.2 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação direta das simulações realizadas para o ano de 2006.....	155
Tabela 4.3 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação difusa das simulações realizadas para o ano de 2006.....	156
Tabela 4.4 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação global das simulações realizadas para o ano de 2007.....	183
Tabela 4.5 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação direta das simulações realizadas para o ano de 2007.....	184
Tabela 4.6 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação difusa das simulações realizadas para o ano de 2007.....	186
Tabela 4.7 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação global das simulações realizadas para o ano de 2008.....	211
Tabela 4.8 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação direta das simulações realizadas para o ano de 2008.....	212
Tabela 4.9 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m ²) das estimativas de irradiação difusa das simulações realizadas para o ano de 2008.....	213

Tabela 4.10 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação global das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2006.	215
Tabela 4.11 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação direta das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2006.	216
Tabela 4.12 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação difusa das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2006.	217
Tabela 4.13 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação global das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2007.	218
Tabela 4.14 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação direta das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2007.	219
Tabela 4.15 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação difusa das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2007.	220
Tabela 4.16 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação global das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2008.	221
Tabela 4.17 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação direta das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2008.	222
Tabela 4.18 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação difusa das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2008.	223

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AERONET	<i>Aerosol Robotic Network</i>
AOT	<i>Aerosol Optical Thickness</i>
ASTER	<i>Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
BSRN	<i>Baseline Solar Radiation Network</i>
CARMA	<i>Community Aerosol and Radiation Model for Atmospheres</i>
CATT	<i>The Transport-Chemistry Model</i>
CATT-BRAMS	<i>Coupled Aerosol and Tracer Transport to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
CCST	Centro de Ciências do Sistema Terrestre
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CERES	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DSA	Divisão de Satélites Ambientais
EDGAR	<i>Emission Database for Global Atmospheric Research</i>
ETR	Equação de Transferência Radiativa
EOS	<i>Earth Observing System</i>
EROS	<i>Earth Resources Observation and Science</i>
GES	<i>Goddard Earth Sciences</i>
GSOD	<i>Global Surface Summary of Day</i>

GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRI	<i>International Research Institute for Climate Prediction</i>
IV	Infravermelho
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar
LBA	<i>Large-Scale Biosphere Experiment in Amazônia</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
METAR	<i>Meteorological Aerodrome Report</i>
MISR	<i>Multi-angle Imaging Spectroradiometer</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MOPITT	<i>Mensuraments of Pollution in the Troposphere</i>
NASA	<i>National Aeronautic and Space Administration</i>
NCDC	<i>National Climatic Data Center</i>
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
OPAC	<i>Optical Properties of Aerosols and Cloud</i>
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i>
PM _{2.5}	Material Particulado 2,5
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
RETRO	<i>Reanalysis of the Tropospheric chemical composition over the past 40 years</i>
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
SCAR-B	<i>Smoke, Clouds and Radiation – Brazil</i>
SMOCC	<i>Smoke, Aerosols, Clouds and Climate</i>
SMOKE	<i>Sparse Matrix Operator Kernel Emissions</i>
SONDA	Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta
VCAN	Vórtice Ciclônico em Altos Níveis
VIIRS	<i>Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite</i>
VIS	Visível
WF_ABBA	<i>Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Balanço radiativo da atmosfera	7
2.2. Equação da transferência radiativa e método de dois fluxos	9
2.3. Aerossóis.....	12
2.3.1. Efeitos dos aerossóis no balanço radiativo da atmosfera	17
2.3.2. Regiões fonte e o transporte dos aerossóis atmosféricos.....	19
2.3.3. Propriedades ópticas dos aerossóis.....	25
2.4. Sensoriamento remoto e os aerossóis atmosféricos.....	29
2.4.1. O sensor MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	30
2.5. Rede mundial de monitoramento de aerossóis - AERONET.....	33
2.6. Modelos de transferência radiativa.....	35
2.7. Espessura óptica dos aerossóis.....	37
2.7.1. Relação entre a visibilidade horizontal e espessura óptica dos aerossóis.....	38
3 DADOS E METODOLOGIA.....	41
3.1. O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR.....	41
3.1.1. Dados de entrada.....	41
3.1.2. Condições de contorno do modelo.....	47
3.2. O modelo CATT-BRAMS – <i>Coupled Aerosol and Tracer Transport to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System</i>	56

3.2.1. Estimativa da visibilidade horizontal a partir da espessura óptica dos aerossóis.....	60
3.3. Adequação da base de visibilidade horizontal.....	61
3.4. Comparação das simulações com dados medidos em superfície.....	64
4 RESULTADOS	67
4.1. Caracterização ambiental do território brasileiro no período de estudo ..	67
4.1.1. Descrição meteorológica e focos de queima detectados - 2006.....	68
4.1.2. Descrição meteorológica e focos de queima detectados - 2007.....	69
4.1.3. Descrição meteorológica e focos de queima detectados - 2008.....	72
4.2. Adequação da base de visibilidade horizontal a partir dos dados de aeroportos.....	76
4.2.1. Mapas de visibilidade horizontal estimada através da espessura óptica dos aerossóis do modelo CATT-BRAMS	82
4.3. Simulações de referência - Modelo BRASIL-SR utilizando a base climatológica original de visibilidade horizontal	87
4.3.1. Simulações para o ano de 2006.....	87
4.3.2. Simulações para o ano de 2007.....	92
4.3.3. Simulações para o ano de 2008.....	97
4.3.4. Conclusões preliminares das simulações de referência com o modelo BRASIL-SR	101
4.4. Simulações com o modelo BRASIL-SR utilizando a base de visibilidade horizontal observada em aeroportos.....	103
4.4.1. Simulações para o ano de 2006.....	103
4.4.2. Simulações para o ano de 2007.....	107
4.4.3. Simulações para o ano de 2008.....	111

4.4.4. Conclusões preliminares das simulações com a base de visibilidade horizontal atualizada	115
4.5. Simulações com o modelo BRASIL-SR utilizando visibilidade horizontal estimada pela espessura óptica dos aerossóis obtidas pelo modelo CATT-BRAMS	116
4.5.1. Simulações para o ano de 2006.....	117
4.5.2. Simulações para o ano de 2007.....	121
4.5.3. Simulações para o ano de 2008.....	125
4.5.4. Conclusões preliminares das simulações com a visibilidade oriunda da espessura óptica obtida do modelo CATT-BRAMS.....	128
4.6. Comparação dos resultados com dados de superfície.....	130
4.6.1. Avaliação das simulações de 2006	130
4.6.2. Avaliação das simulações de 2007	157
4.6.3. Avaliação das simulações de 2008	187
4.6.4. Discussão e conclusões preliminares das avaliações apresentadas	214
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	227
5.1. Trabalhos futuros	229
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	231
APÊNDICE A - MÉTODO DE DOIS-FLUXOS.....	245

1 INTRODUÇÃO

O uso da radiação solar como uma fonte alternativa de energia vem ganhando cada vez mais espaço. A sociedade e seus governos têm procurado opções energéticas, motivados não só pela busca de meios que venham a complementar a atual demanda de energia e seus cenários de crescimento, como também pelo apelo da diminuição do uso de combustíveis fósseis. Isso, basicamente em função do possível esgotamento destes recursos nas próximas décadas (BENTLEY, 2002; GELLER, 2003) e da busca por energias que tenham o atrativo do desenvolvimento sustentável do ponto de vista ambiental.

Os cenários relacionados ao aquecimento global – hoje as concentrações de carbono na atmosfera não são mais tratadas como especulação – exigem um planejamento voltado para o desenvolvimento e o uso dessas tecnologias. Os benefícios do uso da energia solar são muitos, já que esta viabiliza a chegada de energia em regiões demasiadamente custosas em termos de sistemas convencionais, regula a oferta de energia em períodos de estiagem e ainda permite a diminuição do uso de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade. Imenso é o leque de possibilidades, podendo ser utilizada desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até nas grandes centrais, que empregam energia solar concentrada, ou em sistemas de produção de hidrogênio para utilização em células de combustível para a produção de trabalho com emissão zero de carbono (VIANA *et al.*, 2011; RÜTHER; ZILLES, 2011; PEREIRA *et al.*, 2006). Esses mesmos sistemas autônomos são alternativas para oferecer energia elétrica a regiões que não fazem parte do sistema interligado brasileiro (MARTINS *et al.*, 2008). Entretanto, uma barreira para a exploração do recurso energético solar, tanto como fonte de energia elétrica ou para o aquecimento de água, é a disponibilidade de informações confiáveis que são necessárias para entender a distribuição sazonal e espacial deste recurso e a influência do clima nesta variabilidade (MARTINS; PEREIRA, 2011).

O Brasil, justamente por estar em uma faixa de latitude intertropical, possui grande potencial de aproveitamento para a energia solar, mesmo considerando-se a variabilidade intrasazonal (PEREIRA *et al.*, 2006). Entretanto, sua viabilidade precisa antes ser avaliada, através de estudos sobre as características da região; ou seja, o aproveitamento desta fonte de energia passa a ser efetivamente determinado a partir do conhecimento da disponibilidade, variabilidade espacial e temporal. A previsibilidade dos recursos energéticos também é de grande importância na operação de plantas geradoras de eletricidade.

Estudos para o aproveitamento de energia solar podem ser desenvolvidos por meio de duas metodologias: a primeira é a utilização de uma rede de radiômetros estrategicamente distribuídos sobre uma região de interesse; a segunda é o uso de modelos computacionais para parametrização dos processos radiativos e solução da equação da transferência radiativa. Porém, conclusões de estudos como os realizados por Guarnieri *et al.* (2006) e Perez *et al.* (1997), mostram que a precisão das estimativas horárias e diárias fornecidas por modelos numéricos que utilizam imagens de satélite só será inferior que a precisão dos resultados obtidos por interpolação/extrapolação de dados coletados em superfície se a distância entre os radiômetros for inferior a 50 km. Assim, pode-se concluir que as estimativas de modelos numéricos mostram-se mais adequadas diante de regiões de grande extensão, como o território brasileiro. Os modelos computacionais desempenham um papel importante para a avaliação dos recursos de energia solar disponíveis e de uma previsão de médio e curto prazo. A acurácia dos resultados é aumentada à medida que os mesmos representam os fenômenos físicos de maneira mais eficiente; isso remete a parametrizações satisfatórias dos processos envolvidos.

Dentre estes processos, é importante considerar a atenuação da radiação solar direta que chega à superfície pelos aerossóis. Mesmo constituindo uma fração muito pequena da massa total da atmosfera, eles influenciam

significativamente o clima do planeta, não só pela interação da radiação solar com a atmosfera, como pela formação de núcleos de condensação de nuvens. Há uma retirada regular dos aerossóis da atmosfera, realizada naturalmente por processos como precipitação e mistura, mas sua concentração mantém-se relativamente constante. Diversos estudos comprovam que os aerossóis, sejam eles naturais ou antropogênicos, afetam o clima em decorrência dos processos radiativos em que estão envolvidos, à medida que a radiação percorre a atmosfera terrestre (CCOYLLO; ANDRADE, 2002; ANDRADE; SILVA DIAS, 1999; MIRANDA *et al.*, 2002; entre outros).

Quando resultante de queimadas antrópicas, o material particulado lançado para a atmosfera consiste basicamente de *black carbon*, materiais orgânicos e, principalmente, de matéria orgânica parcialmente oxidada (ANDREAE, 1991). Estes compostos possuem elevados coeficientes de absorção da radiação solar, promovendo o aquecimento da atmosfera.

Além dos fatores já conhecidos, o monitoramento dos aerossóis também passou a ser realizado graças aos papéis a eles atribuídos pelos estudos relacionados com as mudanças climáticas, quando os seus efeitos precisariam ser avaliados com uma maior precisão, mesmo em uma escala global. Vários métodos surgiram e foram aperfeiçoados, desde a medição instrumental direta, modelagem ou estimativas a partir de variáveis meteorológicas medidas em superfície.

A grande variabilidade temporal e espacial da concentração dos aerossóis atmosféricos (relacionadas com o tempo de vida, a distribuição vertical e horizontal), bem como as suas fontes (antropogênicas ou naturais), composição química, forma e tamanho, levam a crer que a melhor forma de se obter uma cobertura global seria através do uso de técnicas de sensoriamento remoto; em especial, o uso de satélites. Na década de 90, foram lançados a bordo do satélite TERRA os sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e MISR (*Multi-angle Imaging Spectroradiometer*), voltados

principalmente para monitorar as propriedades ópticas dos aerossóis. O satélite AQUA, lançado em 2002, também possui o sensor MODIS, complementando as observações realizadas pelo satélite TERRA (KAUFMAN *et al.*, 2002). Também foi criada, sob coordenação da NASA (*National Aeronautic and Space Administration*), a rede mundial de radiômetros AERONET (*Aerosol Robotic Network*) que possui mais de 500 radiômetros operando em pontos considerados estratégicos do globo (AERONET – NASA, 2008).

Técnicas específicas de modelagem também passaram a ser utilizadas, agregando modelos atmosféricos para a simulação do transporte dos aerossóis. Pode-se citar o CATT-BRAMS (*Coupled Aerosol and Tracer Transport to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System*), desenvolvido em conjunto pelo CPTEC/INPE e a Universidade de São Paulo (USP), e que hoje é executado em caráter operacional. Os resultados de suas simulações, assim como aqueles oriundos de observações em superfície ou mesmo por satélite, podem ser assimilados em outros modelos, com o intuito de melhorar suas parametrizações dos processos radiativos na atmosfera.

O Grupo de Pesquisa em Recursos Renováveis e Bioenergia do CCST/INPE, atualmente realiza estudos de quantificação de potencial energético solar utilizando o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. Aplicado no mapeamento do potencial energético solar da América Latina através do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), ele serviu como base para a elaboração do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2006) e de diversas publicações (SILVA *et al.*, 2003; COLLE *et al.*, 1999; PEREIRA *et al.*, 2000; MARTINS *et al.*, 2005; MARTINS *et al.*, 2008a; MARTINS *et al.*, 2008b; entre outras). Sua validação foi realizada através da comparação com estimativas produzidas por outros modelos e medidas de campo, mas apesar do BRASIL-SR ter apresentado desempenho semelhante a outros modelos de transferência radiativa em uso para mapeamento de recursos de energia solar (BEYER *et al.*, 2004), o modelo mostrou-se deficiente

na parametrização de aerossóis atmosféricos (MARTINS *et al.*, 2008). Baseados em dados climatológicos de visibilidade horizontal, estes valores não representam as condições observadas no território brasileiro. Soma-se a isso o fato de que os aerossóis atmosféricos apresentarem significativa variabilidade sazonal e interanual, relacionadas com o aumento das emissões antropogênicas.

Com a utilização de uma base de dados climatológicos de aerossóis consistente, condizente com a realidade das grandes cidades e que considere aqueles resultantes da queima de biomassa, a acurácia dos modelos de transferência radiativa pode ser aumentada.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é investigar o impacto da assimilação de diferentes bases de dados, que sirvam para estimar os aerossóis atmosféricos no modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. Será inicialmente desenvolvida uma nova base de visibilidade horizontal, a partir de dados coletados em aeroportos, que possa representar melhor as condições atmosféricas observadas no Continente Sul-Americano, em especial no Brasil. Outras bases de dados oriundas de modelos numéricos que simulam a emissão e o transporte de poluentes também serão avaliadas, com o intuito de aprimorar a parametrização dos aerossóis.

Como objetivos específicos, este estudo propõe, nesta ordem:

- Gerar uma base de visibilidade horizontal atualizada, baseada na metodologia descrita por Husar *et al.* (2000);

- Realizar simulações com o modelo BRASIL-SR, utilizando fontes distintas de visibilidade horizontal para estimativa dos aerossóis atmosféricos. Estas simulações serão realizadas em meses que possam representar a sazonalidade dos aerossóis, entre os anos de 2006 e 2008;
- Comparar os resultados das simulações do BRASIL-SR, com dados de radiação solar em superfície, com o intuito de quantificar os desvios decorrentes do uso das novas bases de dados;
- Identificar a base de dados que proporciona a melhor quantificação dos aerossóis na atmosfera e em quais condições a escolha foi mais efetiva, em cada uma das regiões brasileiras, levando em consideração a sua sazonalidade;
- Desenvolver rotinas computacionais que permitam a atualização das bases de dados utilizadas na parametrização dos aerossóis, visando a operacionalização do procedimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Balanço radiativo da atmosfera

O Sol é a maior fonte de energia do sistema Terra-Atmosfera, possuindo um diâmetro de $1,39 \times 10^6$ km e um volume de $1,412 \times 10^{18}$ km³. Sua energia desencadeia uma série de processos térmicos, dinâmicos e químicos. Os gradientes de temperatura da superfície terrestre propiciam os movimentos do ar em todas as escalas, como a circulação geral da atmosfera ou mesmo as brisas.

Essa energia se propaga sem necessidade da existência de um meio material, naquilo que é definido como radiação, estando assim, associada a uma irradiância espectral (quantidade de energia radiante, que em um intervalo unitário de comprimento de onda, atravessa uma unidade de área tomada perpendicularmente à direção considerada, em uma unidade de tempo). Conhecendo o seu valor, pode-se determinar aquela que é a variável mais importante na quantificação da radiação solar como fonte de energia: a densidade de fluxo de radiação. Esta grandeza integrada em todo o espectro representa a quantidade de energia radiante que passa através de um plano na unidade de tempo e de área. Para melhor compreensão dos termos empregados, chama-se irradiância, a densidade de fluxo de radiação incidente sobre uma superfície, e emitância radiante, a densidade de fluxo de radiação emitido por uma superfície, expressa em W/m².

A constante solar, definida como a irradiância solar que chega ao topo da atmosfera, tem o valor de aproximadamente 1367 W/m², sofrendo pequenas variações ao longo do ano em virtude de efeitos astronômicos. Efetivamente, a irradiância solar que chega à superfície da Terra também sofre influência de

outros fatores, oriundos não só da própria fonte de energia, como de outros componentes presentes em sua atmosfera.

As propriedades destes constituintes tornam a transmissão da radiação solar na atmosfera um processo bastante complicado, pela quantidade de fatores envolvidos. A absorção, reflexão e a atenuação podem ocorrer por partículas e pelos gases, estando relacionados com o tamanho, comprimento de onda ou mesmo o gás envolvido. Há então uma relação direta com o balanço radiativo do planeta, que é mostrado de maneira simplificada na Figura 2.1.

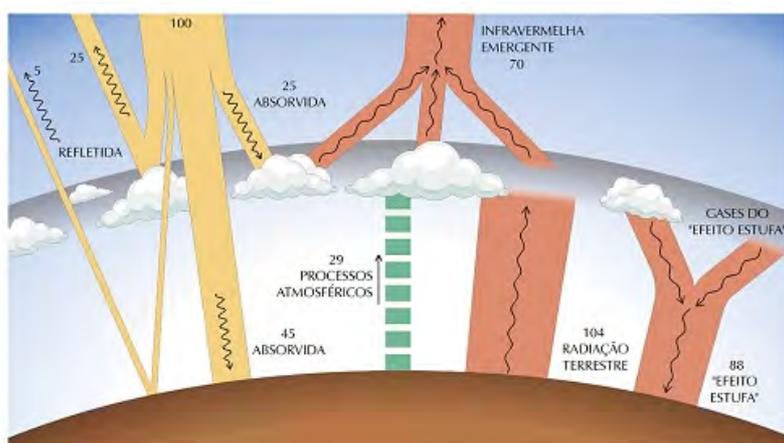


Figura 2.1 – Processos de interação da radiação solar com a atmosfera e superfície terrestre.

Fonte: Pereira *et al.* (2006).

Considerando-se os principais processos de reflexão, aproximadamente 70% da energia que chega à Terra é absorvida pelo sistema, que o faz de forma seletiva. Os principais gases absorvedores são o ozônio, o vapor de água e o dióxido de carbono, sendo os dois últimos os principais gases do efeito estufa. A Figura 2.2 faz menção às curvas de irradiação solar no topo da atmosfera, na superfície e a emitância de um corpo negro a 5900K (representada pela linha tracejada), em função do comprimento de onda e dos respectivos absorvedores.

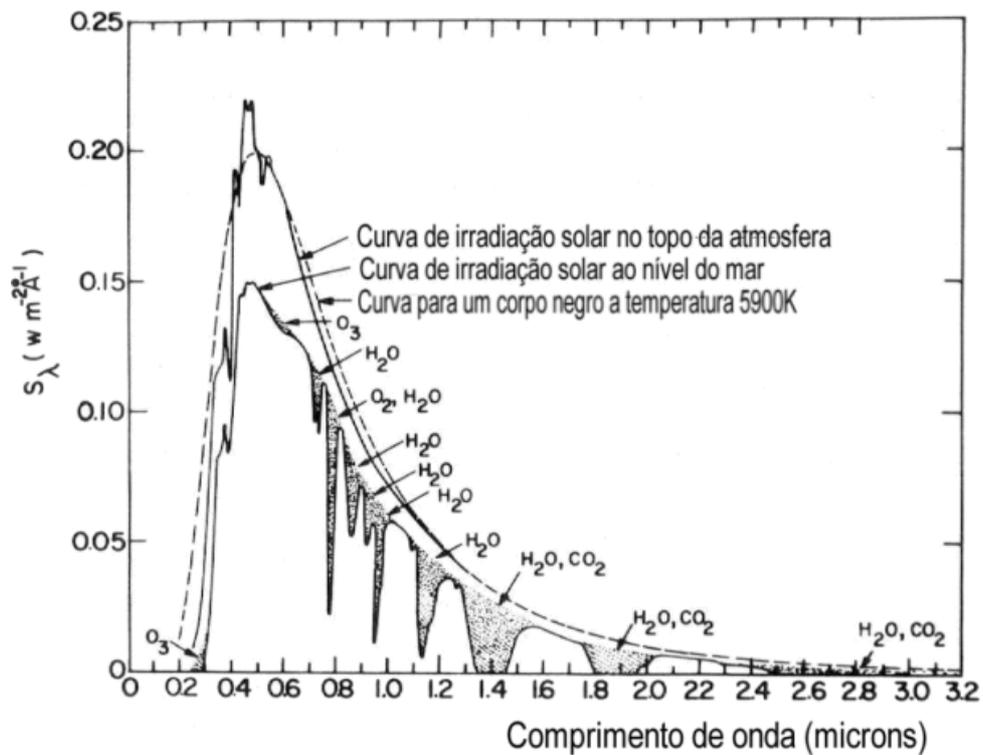


Figura 2.2 – Curvas de irradição no topo da atmosfera e na superfície terrestre em função dos comprimentos de onda.

Fonte: Adaptado de Kondratyev (1969).

2.2. Equação da transferência radiativa e método de dois fluxos

A equação de transferência radiativa – ETR – descreve a propagação da energia radiante através da atmosfera. Essa equação baseia-se no princípio de conservação de energia e pode ser facilmente compreendida se considerarmos um elemento de volume da atmosfera descrito por $dA \cdot ds$ em torno do ponto M onde dA representa a área do elemento perpendicular à direção de propagação da radiação s ; e ds é o comprimento do elemento de volume na direção de propagação conforme apresentado na figura 2.3.

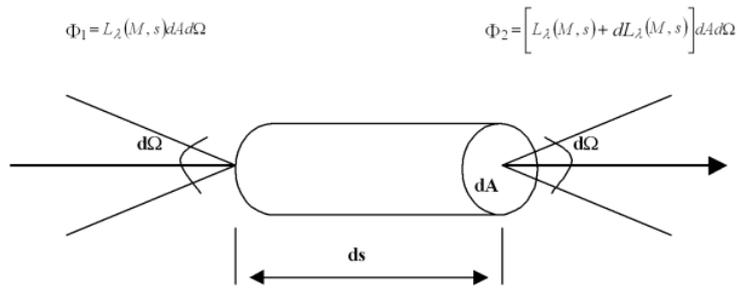


Figura 2.3 – Esquema de propagação da radiação em um elemento de volume.

Fonte: Adaptado de Martins *et al.*, 2004.

Considerando a atmosfera um meio não homogêneo, as propriedades físicas, como albedo de espalhamento simples; coeficiente de extinção; função de fase de espalhamento; dependem da posição M do elemento de volume. Faz-se, então, a consideração do fluxo de energia entrando no elemento de volume (Equação 2.1), o fluxo de energia deixando o elemento de volume (Equação 2.2), a fração do fluxo de energia que é perdida por absorção e espalhamento ao longo do percurso (Equação 2.3) e o ganho de fluxo de energia devido ao espalhamento ocorrido de outras direções para a direção s e a emissão de radiação do próprio elemento de volume (Equação 2.4) para a obtenção daquela que é a Equação da Transferência Radiativa (Equação 2.5).

$$\phi_1 = L_\lambda(M, s)dAd\Omega \quad (2.1)$$

$$\phi_2 = \left[L_\lambda(M, s) + \frac{dL_\lambda(M, s)}{ds} ds \right] dAd\Omega \quad (2.2)$$

$$\phi_3 = \sigma_{e\lambda}(M)L_\lambda(M, s)dAd\Omega ds \quad (2.3)$$

$$\phi_4 = \sigma_{e\lambda}(M)J_\lambda(M, s)dAd\Omega ds \quad (2.4)$$

$$\phi_2 - \phi_1 = \phi_4 - \phi_3$$

ou

$$\frac{dL_\lambda(M, s)}{ds} = \sigma_{e\lambda}(M)[L_\lambda(M, s) - J_\lambda(M, s)] \quad (2.5)$$

O método de Dois-Fluxos é uma aproximação de baixo custo computacional para a solução da ETR. O método é baseado na decomposição do fluxo de radiação em dois sentidos de propagação opostos e na direção perpendicular à superfície - um fluxo de radiação no sentido do topo da atmosfera e outro incidente na superfície. Uma análise comparativa dos resultados desta metodologia com a solução exata da equação de transferência radiativa determinou discrepâncias da ordem de 3% (LENOBLE, 1993). Assume-se a geometria mais simples para o meio absorvedor/espalhador (geometria plano-paralela), onde as propriedades do meio são constantes num plano paralelo aos seus contornos e a radiação incidente é constante nesses contornos. Esta é uma boa aproximação para a atmosfera planetária, onde as variações verticais de todas as propriedades são muito mais rápidas do que as suas variações horizontais. Nesta geometria, a posição do ponto M é descrita apenas por três variáveis: a altitude, o ângulo zenital e o ângulo azimutal. Dessa forma, a ETR pode ser reescrita na forma da Equação 2.6:

$$\mu \frac{dL_\lambda(z; \mu, \phi)}{dz} = -\sigma_{e\lambda}(z)[L_\lambda(z; \mu, \phi) - J_\lambda(z; \mu, \phi)] \quad (2.6)$$

A simplificação que torna a solução da equação de transferência radiativa mais atrativa do ponto de vista matemático é assumir que o fluxo de radiação vertical é independente do ângulo de azimute. Essa hipótese é válida quando a espessura ótica do meio é alta de modo que o feixe de radiação direta perde sua identidade devido ao espalhamento intenso. Este é o caso da atmosfera com nuvens espessas. Minimizando os erros desta simplificação, são

introduzidas variáveis como a razão de retro-espalhamento, para parametrizar a função de fase do espalhamento, resultando nas equações 2.7 e 2.8.

$$d \frac{F^+(\tau)}{d\tau} = \alpha_1 F^+(\tau) - \alpha_2 F^-(\tau) - \alpha_3 \overline{\omega} \pi F e^{-\frac{\tau}{\mu}} \quad (2.7)$$

$$d \frac{F^-(\tau)}{d\tau} = \alpha_4 F^+(\tau) - \alpha_5 F^-(\tau) - \alpha_6 \overline{\omega} \pi F e^{-\frac{\tau}{\mu}} \quad (2.8)$$

A dedução detalhada desta aproximação pode ser verificada no apêndice A.

2.3. Aerossóis

Os aerossóis são partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera, que variam de alguns nanômetros a dezenas de micrômetros (SEINFELD e PANDIS, 1998). Produzidos de diversas maneiras, podem ter sua origem no solo ou na superfície da água, sendo a sua composição e tamanho dependentes da sua fonte de emissão e de processos físico-químicos. Justamente a composição química e seu o tamanho determinam o tipo de interação que este material particulado poderá ter com a radiação. O tamanho das partículas é, usualmente, expresso em relação ao seu tamanho aerodinâmico, definido como o diâmetro de uma esfera que possui densidade unitária e com a mesma velocidade de deposição que a partícula em questão (HINDS, 1982).

Na literatura, são encontradas algumas classificações dos aerossóis, com base nas suas dimensões e mecanismos de origem. Seinfeld e Pandis (1998) os dividiram em dois grupos distintos, apenas em função do seu tamanho: partículas finas, com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 μm , e grossas, com

diâmetro aerodinâmico maior ou igual a 2,5 μm . Whitby *et al.* (1972a, 1972b) definiram uma distribuição de tamanhos das partículas em relação à origem, às características químicas e à processos de remoção, sugerindo três grupos de aerossóis – uma moda grossa e dois tipos de modas finas – sendo os núcleos de Aitken aquelas com diâmetro entre 0,01 μm e 0,08 μm e moda de acumulação aquelas entre 0,08 μm a 2 μm .

Finlayson-Pitts e Pitts (1999) apresentaram um esquema de distribuição com quatro modas, mantendo a classificação de Whitby *et al.* (1972a, 1972b) e inserindo aquelas que seriam as partículas ultrafinas. Eles comentam que a distribuição do tamanho das partículas está relacionada não apenas com suas fontes, mas também com seus efeitos na saúde, visibilidade e clima.

Os núcleos de Aitken são originados em processos de conversão gás-partícula e em atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e queima de biomassa. As partículas grandes são formadas por processos de coagulação e condensação ou processos mecânicos como ação de ventos sobre superfícies de continentes e oceanos; já as partículas pequenas apresentam difusão quase desprezível, atuando como receptoras de partículas menores, possuindo, inclusive, uma rápida velocidade de sedimentação, permanecendo curtos períodos de tempo em suspensão na atmosfera (JAENICKE, 1985; HINDS, 1982). As propriedades ópticas dos aerossóis são descritas pela teoria de Mie, considerando a hipótese de partículas esféricas e utilizando dois parâmetros: o índice de refração das partículas que é característico da natureza química das partículas; e a distribuição de tamanhos das partículas.

Köepke *et al.* (1997) afirmam que a distribuição de tamanhos está relacionada a fatores como a origem e idade dos aerossóis e que é bastante variável, mesmo para um mesmo tipo de aerossol.

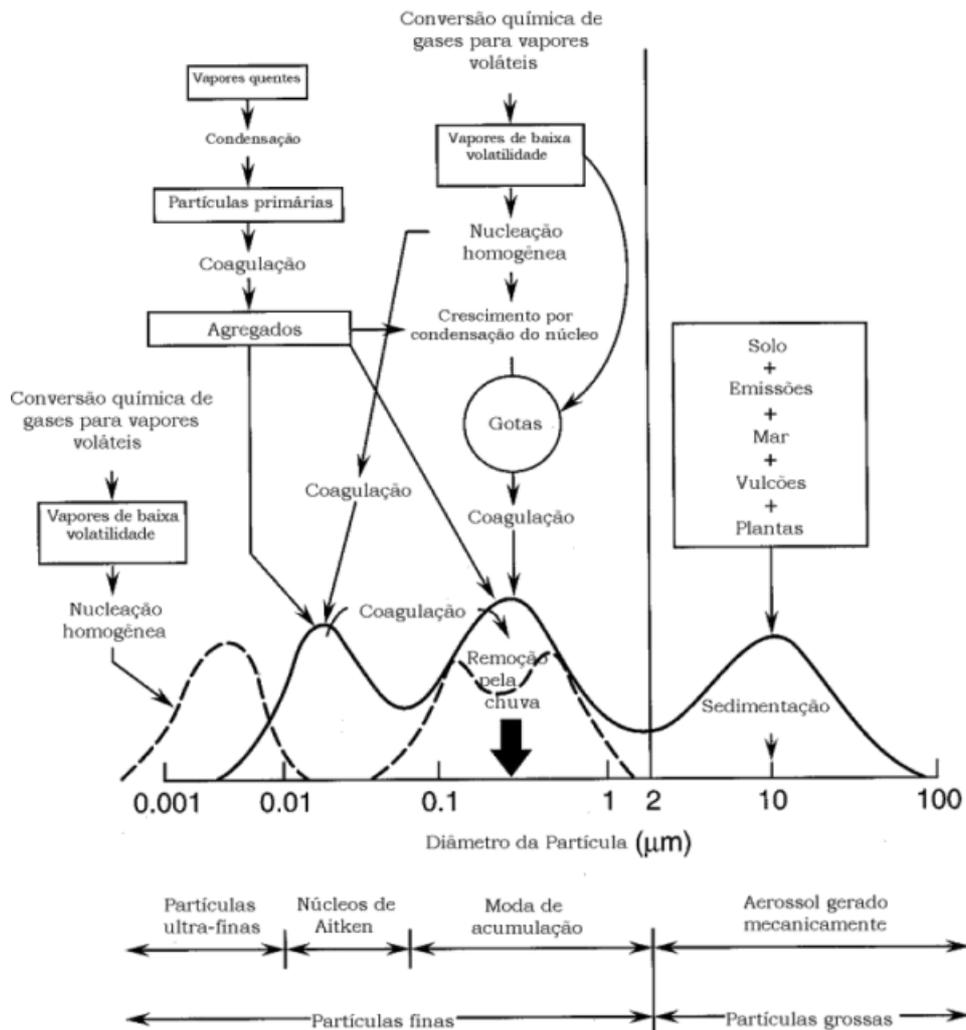


Figura 2.4 – Modas, fontes e processos de remoção dos aerossóis atmosféricos, Fonte: adaptado de Finlayson-Pitts e Pitts (1980).

Quanto à origem, os aerossóis são classificados como sendo primários - quando as emissões tem origem direta na fonte - e secundários - quando há uma conversão da fase gasosa para a fase particulada. Sua origem pode ser ainda natural ou antropogênica.

As principais fontes naturais são a ação do vento no solo ou no mar (gerando poeira e gotículas), as emissões vulcânicas e os processos biológicos, como espalhamento de pólen. Quanto aos processos antrópicos, podemos mencionar a poluição industrial e a queima de biomassa e de combustíveis

fósseis que geram gases e material particulado, como resíduo destes processos. Raes *et al.* (2000) afirmam que estes seriam os principais impactos resultantes das atividades humanas na formação de aerossóis, aumentando significativamente o número de partículas em suspensão na atmosfera, em especial nas grandes áreas urbanas. Depois de formados, os aerossóis podem sofrer alterações causadas por reações químicas e processos como difusão, coagulação, sedimentação, evaporação e nucleação (JENNINGS, 1993).

A variabilidade sazonal das condições meteorológicas influencia diretamente a quantidade de aerossóis em suspensão na atmosfera. Após o início da estação seca na região centro-norte do Brasil, observa-se condições propícias para o aumento da queima de biomassa; e estas podem ocorrer de maneira natural ou mesmo através de ações antrópicas. Além disso, o tempo de permanência dos aerossóis na atmosfera é maior durante a estação seca em razão da menor retirada dos aerossóis da atmosfera por processos de mistura e precipitação (ANDRADE *et al.*, 2004; FREITAS, 2003). Este último fato torna-se um aspecto importante na região sudeste do Brasil onde estão localizados os centros urbanos com maior desenvolvimento econômico do país, com a contribuição efetiva dos veículos, indústrias e ressuspensão de partículas do solo (CASTANHO, 2005; ANDRADE *et al.*, 2004; CASTANHO; ARTAXO, 2001).

Albuquerque (2010), em estudo que visou caracterizar físico-quimicamente os aerossóis na região metropolitana de São Paulo, menciona que na troposfera estas partículas são compostas por sulfatos, nitratos, amônio, aerossol carbonáceo, sais marinhos, metais do solo, metais pesados e água. O carbonáceo, presente em grandes concentrações nos aerossóis considerados urbanos, é constituído por carbono orgânico e carbono elementar, sendo o primeiro emitido por fontes antrópicas ou resultado de condensação atmosférica de gases pouco voláteis. Já o segundo, é emitido diretamente por processos de combustão incompleta e é conhecido como *black carbon* (PROSPERO *et al.*, 1983). Este é um forte absorvedor da radiação solar, provocando aquecimento da atmosfera. A Figura 2.5 mostra como a visibilidade

é reduzida devido ao aumento da concentração de aerossóis, em especial aqueles formados pela atividade antrópica de grandes cidades.



(a)



(b)

Figura 2.5 – Redução da visibilidade horizontal decorrente do aumento da espessura óptica dos aerossóis oriundos da queima de biomassa, nas cidades de Porto Velho (a) e Manaus (b).

Foto: Elton Bitencourt.

As partículas de aerossol na troposfera apresentam vida média curta (de dias a semanas). Uma das consequências dessa característica é a distribuição espacial não-homogênea, com forte correlação com suas fontes de emissão (JONES, 1995; HOLBEN *et al.*, 1996)

2.3.1. Efeitos dos aerossóis no balanço radiativo da atmosfera

A complexa influência dos aerossóis no balanço radiativo não é completamente entendida e tem sido avaliada em diversos estudos. Os efeitos radiativos dos aerossóis dependem do tamanho e da composição química da partícula. Já as propriedades de espalhamento e absorção da radiação dependem da morfologia da partícula e do tipo de mistura entre os materiais absorvedores e os não absorvedores de radiação (TOON, 1995; MARTINS *et al.*, 1998).

Segundo Hess *et al.* (1998), a influência dos aerossóis atmosféricos no balanço radiativo do planeta é mais significativa no intervalo espectral da radiação de ondas curtas, mas não é desprezível nos demais comprimentos de onda. Os efeitos radiativos das partículas emitidas pela queima de biomassa no espectro visível da radiação solar são em sua maior parte devido às partículas pequenas - modo de nucleação e acumulação e as características físicas destas partículas não variam de ano para ano ou com o tipo de vegetação de onde elas se originaram (REMER *et al.*, 1998; LENOBLE, 1991).

Aerossóis de queima de biomassa tornam-se parte importante do processo radiativo na atmosfera, podendo atenuar a forçante radiativa em até 25 W/m^2 na superfície (ANDERSON *et al.*, 1996) com o aumento de sua espessura óptica em situações de queima de biomassa. Whitlock e Tarpley (1996) mostraram que a superestimativa da irradiação solar à superfície pode ser acima de 120 W/m^2 na presença de produtos de queimadas na atmosfera (incluindo aerossóis) em medidas realizadas na África. Procópio *et al.* (2003; 2004) também afirmam que a alta concentração de partículas faz com que haja um déficit significativo de radiação superficial, com picos instantâneos de até 300 W/m^2 , e com valores médios na estação de queimadas em Alta Floresta da ordem de 28 W/m^2 .

Os aerossóis também espalham a radiação solar, refletindo-a novamente de volta para o espaço. Este processo, em um primeiro momento, provoca resfriamento na superfície da Terra, sendo as partículas finas mais efetivas no espalhamento da radiação solar. Os aerossóis também influenciam o tamanho, abundância, e taxa de produção de gotículas de nuvens modificando o albedo e o seu tempo de vida, assim como a fração de cobertura do céu. Estes efeitos nas propriedades radiativas das nuvens são considerados indiretos. Jones (1995) menciona que o efeito radiativo indireto depende de processos complexos envolvendo as partículas de aerossol e a nucleação e crescimento de gotas de nuvens, dificultando a quantificação dos efeitos dos aerossóis no balanço radiativo.

A forçante radiativa dos aerossóis no clima é similar, mas oposta em sinal àquela gerada pelos gases de efeito estufa (POWER, 2003). Absorção e re-irradiação da radiação de onda longa pelos gases de efeito estufa aquece o sistema Terra – Atmosfera, e os aerossóis passam a resfriá-lo (IPCC, 2001). Power (2003) também menciona que a influência destes aerossóis no sistema climático é reconhecida como algo extremamente importante no contexto das mudanças climáticas, particularmente quando se trata das emissões antrópicas e seu aumento.

Segundo o IPCC (2007), aerossóis atmosféricos possuem uma forçante radiativa global de $-0,50 \pm 0,40 \text{ W/m}^2$, enquanto que o efeito indireto global é da ordem de $-0,70 \text{ W/m}^2$ (podendo variar entre $-1,8$ até $-0,3 \text{ W/m}^2$). Comparado com a forçante radiativa do CO_2 , que pode variar entre $+1,49$ e $+1,83 \text{ W/m}^2$, sua contribuição é bastante significativa. Diversos estudos focam a influência dos aerossóis no clima, com conclusões semelhantes em termos dos seus efeitos no balanço radiativo e, por consequência, no balanço térmico da atmosfera (WARD *et al.*, 1992; BOTKIN; KELLER, 1995; NOBRE *et al.*, 1998; KAUFMAN; TANRÉ, 1998; CHRISTOPHER *et al.*, 2000).

As interações entre os aerossóis e o clima também representam uma grande fonte de incerteza na forçante climática, e as razões para isso incluem a variabilidade das propriedades físico-químicas dos aerossóis e a complexidade das interações que podem ocorrer na atmosfera. A concentração dos aerossóis apresenta uma alta variabilidade temporal e espacial em razão do relativamente curto tempo de vida (IPCC, 2001). Acrescente-se a essa heterogeneidade, outro fator complicador relacionado à aquisição de dados de campo: a maior parte dos estudos são esporádicos, curtos e geograficamente limitados. Além disso, métodos precisos para quantificação da turbidez dos aerossóis – ou do montante de aerossóis da coluna – requerem instrumentação sofisticada, assim como são necessários dias de céu claro, o que contribui ainda mais para a fragmentação dos dados (POWER, 2003).

Especificamente na América do Sul, podemos citar experimentos como o SCAR-A e SCAR-B (REID; HOBBS, 1998; REID *et al.* 1998) e do *Large-Scale Biosphere Experiment in Amazonia - Smoke, Aerosols, Clouds and Climate* (LBA-SMOCC) (ANDREAE *et al.* 2004; GUYON *et al.* 2005), importantes para a caracterização e obtenção de mais dados sobre os aerossóis da queima de biomassa. Esforços têm sido realizados nos últimos anos para a melhoria destas informações, como a operação da rede Aeronet e o uso de sensores específicos em satélites para a obtenção de informações sobre os aerossóis atmosféricos.

2.3.2. Regiões fonte e o transporte dos aerossóis atmosféricos

Emissões resultantes da queima de biomassa, da poluição industrial e das emissões das grandes cidades são as principais fontes de poluição em uma escala de impacto global. Falando especificamente das queimadas, estima-se que até 80% delas ocorram nos trópicos, em especial no Brasil e na África

Austral, e assim produzindo uma grande quantidade de gases e material particulado (CRUTZEN; ANDREAE, 1990). Pinker e Laszlo (1989) afirmam que grande parte das incertezas na irradiação solar na superfície estimada por modelos computacionais resulta da variabilidade geográfica dos aerossóis na atmosfera por fenômenos naturais e queimadas, juntamente com a variabilidade da cobertura de nuvens.

Chu *et al.* (2003) destacam em seu trabalho que existe uma forte sazonalidade das fontes globais emissoras de aerossóis, citando especificamente a queima da biomassa na África e na Amazônia entre setembro e novembro, a poeira de desertos, em especial o Saara para a América Central entre junho e agosto e da Ásia para a América do Norte entre março e maio. Citam também as emissões urbanas e industriais na costa leste dos Estados Unidos, China, Índia e no oeste Europeu entre junho e agosto.

A queima de biomassa para manejo de áreas agrícolas e desflorestamento é uma fonte importante de gases e particulados, gerando grande impacto na química da troposfera e estratosfera e no clima da Terra (MARIANO, 2010; FERREK *et al.*, 1998; REID *et al.*, 1998; Setzer *et al.*, 1994; KAUFMAN *et al.*, 1994). Aliam-se à queima de origem antropogênica as queimadas de origem natural, mais comuns nos períodos de baixos índices pluviométricos. No Brasil, estes períodos tem início no mês de julho e término em outubro, sendo que o pico do número de focos de queimada ocorre entre os meses de agosto e outubro. Martins (2001) observou que a concentração de aerossóis de queimada na região amazônica pode atingir valores até vinte vezes superiores à concentração natural de aerossóis, observada durante a estação úmida. Também são observadas queimadas nas regiões Sudeste e Nordeste do Brasil no mês de junho e dezembro, respectivamente, período o qual tradicionalmente ocorre o início da colheita da cana de açúcar (PEREIRA *et al.*, 2000). Além do lançamento de gases e aerossóis à atmosfera, a queima de biomassa atua no sistema climático alterando o albedo de superfície (através da mudança da cobertura do solo), alterando o ciclo hidrológico do planeta, o ciclo

biogeoquímico do sistema climático e a estabilidade de ecossistemas (LEVINE *et al.*, 1996; KAUFMAN *et al.*, 1994).

Aires e Kirchoff (2001) afirmam que existem contrastes entre regiões fonte e não fonte de aerossóis provenientes da queima da biomassa, uma vez que não há uniformidade na distribuição espacial das queimadas no Brasil. Porém, mesmo em regiões de pouca queima, elevadas concentrações de gases traço e aerossóis gerados por queimadas podem ser encontradas, em função do transporte atmosférico. Dentre as conclusões deste estudo, cita-se a existência de transporte entre regiões fonte e não fonte de queimada, no continente sul-americano em baixas altitudes (até 4 km). Esse transporte é responsável pela observação de aerossóis oriundos de queimadas na Amazônia na região Sudeste do Brasil.

Segundo Reid *et al.* (1998), os aerossóis dispersam-se rapidamente, mas ficam retidos no interior da camada de inversão dos ventos alísios, que se estende até uma altura entre 3 e 4 km, misturando-se com aerossóis de outras fontes antrópicas, com os aerossóis biogênicos e com aerossóis de solo. Landulfo *et al.* (2005) afirmam que normalmente a camada entre 1-3 km é responsável por 20-25% de toda a quantidade de aerossóis da troposfera. A figura 2.6 mostra um esquema dos processos envolvidos na dispersão em escala regional e continental dos aerossóis após a emissão em eventos de queimada.

Landulfo *et al.* (2005) mencionam também que além do transporte local de aerossóis, dentro das próprias regiões fonte, partículas com características diferentes, como aquelas oriundas da queima de biomassa na região amazônica são encontradas na região metropolitana de São Paulo. Freitas *et al.* (2005) afirmam que a densidade de biomassa e a alta taxa de calor permitem que as queimadas de florestas consigam enviar o material particulado para a baixa e média atmosfera, entre 3 e 10 km de altura, enquanto queimadas em cerrados e pastagem mantem o material resultante da

queima apenas na camada limite; ou seja, a estabilidade termodinâmica é um importante fator para se conhecer a altura final da pluma.

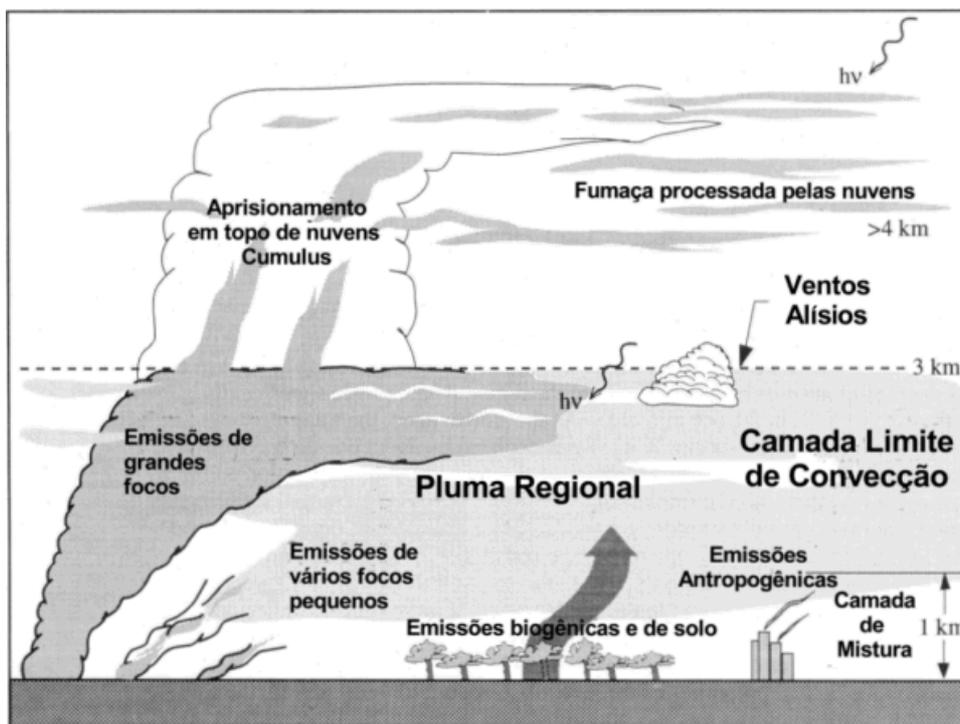


Figura 2.6 – Representação dos processos envolvidos na dispersão dos aerossóis atmosféricos oriundos da queima de biomassa.

Fonte: adaptado de Reid *et al.* (1998).

Mariano (2010), estudando eventos de queima ocorridos nos anos de 2007 e 2009, encontrou indícios de que queimadas de diversas regiões da América do Sul afetam o estado de São Paulo. Dentre suas conclusões, menciona que trajetórias preferenciais indicaram a influência de sistemas sinóticos predominantes para o transporte deste material particulado. Ele indica ainda a variação da posição do anticiclone subtropical como fator sinótico mais impactante na trajetória das parcelas, verificando em diversos níveis atmosféricos a mesma trajetória preferencial em direção à Região Metropolitana da cidade de São Paulo. Esta é uma interação importante, já que indica que além da própria poluição urbana, soma-se a poluição oriunda da queima de biomassa.

Jacobson (1999) afirma que existem dois padrões de poluição antrópica urbana: o *smog* fotoquímico é o mais comum – quando a intensidade da luz solar e as emissões por combustão de material fóssil são altas – e o *smog* tipo “Londres” – quando as emissões de enxofre pelo processo industrial são altas, o ambiente recebe menor intensidade de luz solar e ainda apresenta umidade relativa alta.

Husar *et al.* (2000) realizaram uma análise da distribuição do coeficiente de extinção dos aerossóis continentais, a partir de dados de visibilidade horizontal de 7000 estações ao redor do globo no período de 1994 a 1998. Os autores derivaram coeficientes locais de extinção dos aerossóis. Dentre as metodologias apresentadas, foram utilizadas variáveis meteorológicas como filtros no processamento dos dados de visibilidade, com o propósito de eliminar a influência de hidrometeoros, como chuva, neve e neblina. O resultado final de seu trabalho é um coeficiente de extinção de aerossóis “meteorologicamente filtrado”, definido como B_{ext} (km^{-1}).

O trabalho identificou regiões com elevada carga de aerossóis ao redor do mundo, inclusive afirmando que a região com maior carga na América do Sul é a da Bolívia e nas adjacências dos Andes, com um pico entre os meses de Agosto e Novembro. Seus mapas foram baseados na visibilidade média diária, o que enfatiza regiões úmidas com aerossóis higroscópicos (pico em horário noturno) e regiões áridas e empoeiradas com maior extinção nos horários diurnos.

A figura 2.7, de Kaufman *et al.* (2002), mostra a distribuição da espessura óptica dos aerossóis derivados de medidas do MODIS para setembro de 2000. As caixas brancas destacam regiões identificadas como sendo aquelas com elevadas cargas de aerossóis, sendo os mais finos oriundos de atividades antrópicas, como a poluição das grandes cidades na América do Norte, Europa e Sul / Leste da Ásia, além da queima de biomassa na América do Sul e África. Mostram também partículas mais grossas, como a poeira do continente

africano, as partículas de sal no hemisfério sul e a poeira do deserto entre a África e a Ásia.

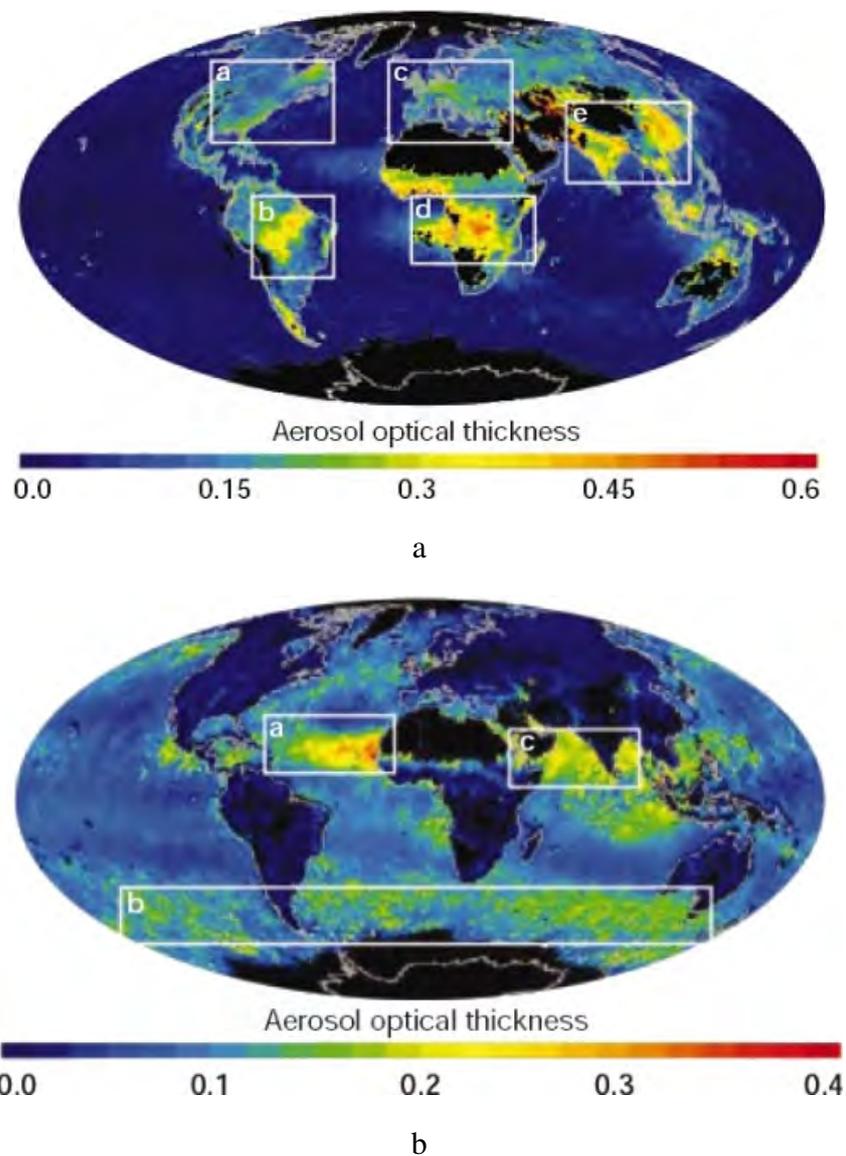


Figura 2.7 – Espessura óptica dos aerossóis finos (a) e grossos (b) medida pelo sensor MODIS para o mês de setembro de 2000.

Fonte: Kaufman *et al.* (2002).

2.3.3. Propriedades ópticas dos aerossóis

A caracterização das propriedades ópticas dos aerossóis atmosféricos é uma tarefa difícil, já que os aerossóis presentes na atmosfera são originados por fontes distintas; isso os transforma em uma espécie de mistura de diversos tipos de aerossóis. Assim, para minimizar esse problema, considera-se os aerossóis atmosféricos como uma mistura uniforme de vários tipos, associados às fontes locais de emissão (HESS *et al.*, 1998; KÖEPKE *et al.*, 1997; LENOBLE, 1993; SELBY *et al.*, 1976), conforme apresentado na tabela 2.1.

A partir destes modelos, foram definidos perfis atmosféricos de aerossóis (apresentados na tabela 2.2) em modelos de transferência radiativa, como Pinker e Lazlo (1992; 1989); Darnell (1992; 1988), entre outros. Falando especificamente do modelo BRASIL-SR, o perfil de aerossóis utilizado foi definido por McClatchey *et al.* (1972) e sua distribuição recebe uma contribuição importante das partículas grandes e gigantes.

Tabela 2.1 - Modelos básicos de aerossóis propostos pelo *Standard Radiation Atmosphere*

Modelo de Aerossol	Composição	% em Volume (mistura externa)
Continental	Poeira	70
	Compostos solúveis em água	29
	Carbono elementar	1
Urbano/Industrial	Compostos solúveis em água	61
	Carbono elementar	22
	Poeira	17
Marítimo	Oceânico	95
	Compostos solúveis em água	5
Estratosférico	H ₂ SO ₄	100

Fonte: modificada de Lenoble (1993).

Köepke *et al.* (1997) determinaram as propriedades óticas dos aerossóis atmosféricos considerando uma mistura externa uniforme entre alguns de 10 tipos básicos – carbono elementar, compostos solúveis em água, compostos insolúveis em água, mineral e sal marinho em três distribuições de tamanhos diferentes, e sulfato – sendo as propriedades óticas de cada um dos tipos determinadas pela teoria de espalhamento de Mie para partículas esféricas.

A Tabela 2.3 apresenta modelos de aerossóis atmosféricos propostos pelo *Global Aerosol Data Set* (HESS *et al.*, 1998), com diferentes razões de mistura entre alguns dos tipos básicos, de acordo com os aerossóis existentes em cada condição.

Tabela 2.2 – Características dos perfis verticais de aerossóis propostos para atmosfera padrão

Perfil Atmosférico	Espessura da camada atmosférica (km)	Tipo de Aerossol
Urbano	0 – 2 2 – 12	Urbano/industrial Continental
Continental I	0 – 12*	Continental
Marítimo I	0 – 2 2 – 12	Marítimo Continental
Continental II	0 – 12**	Continental
Marítimo II	0 – 2 2 – 12***	Marítimo Continental
Convectivo	0 – 4,382 4,382 – 12	Continental Continental
Estratosférico	12 – 20 20 – 30	75% H ₂ SO ₄ 75% H ₂ SO ₄

* Duas camadas atmosféricas distintas do mesmo tipo de aerossol, com espessuras óticas diferentes. Fronteira das camadas em 2 km de altitude.

** Duas camadas atmosféricas distintas do mesmo tipo de aerossol, com espessuras óticas diferentes. Fronteira das camadas em 6 km de altitude.

*** Duas camadas atmosféricas distintas do aerossol continental com espessuras óticas diferentes. Fronteira das camadas estão em 2 a 6 km e 6 a 12km de altitude.

Fonte: modificada de Lenoble (1993).

Reid *et al.* (1998) determinaram valores de propriedades óticas dos aerossóis responsáveis pelas plumas regionais, durante o experimento SCAR-B. Foram obtidas a eficiência de espalhamento (β), a razão de retroespalhamento ($\alpha_s^{(1)}$), a eficiência de absorção (α_a) e o albedo de espalhamento simples (ω_0), evitando a proximidade de pontos de queimada para que não houvesse a influência de aerossóis “jovens” – definidos no estudo como sendo aqueles com tempo de vida menor que 4 minutos.

Tabela 2.3 – Modelos de aerossóis utilizados para determinação das propriedades óticas de aerossóis

Modelo de Aerossol	Composição (tipos de aerossol)	% em massa (mistura externa)
Continental Limpo	Compostos solúveis em água	59,1
	Compostos insolúveis em água	40,9
Continental Médio	Compostos solúveis em água	58,3
	Compostos insolúveis em água	39,6
	Carbono elementar	2,1
Continental Poluído	Compostos solúveis em água	65,8
	Compostos insolúveis em água	29,8
	Carbono elementar	4,4
Urbano	Compostos solúveis em água	56,3
	Compostos insolúveis em água	35,8
	Carbono elementar	7,9
Desértico	Compostos solúveis em água	1,8
	Mineral (modo de nucleação)	3,3
	Mineral (modo de acumulação)	74,7
	Mineral (partículas grandes)	20,2
Marítimo Limpo	Compostos solúveis em água	7,1
	Sal Marinho (modo de acum.)	90,8
	Sal Marinho (partículas grandes)	2,1
Marítimo Poluído	Compostos solúveis em água	16,0
	Sal Marinho (modo de acum.)	81,4
	Sal Marinho (partículas grandes)	1,9
	Carbono elementar	0,6
Marítimo Tropical	Compostos solúveis em água	5,8
	Sal Marinho (modo de acum.)	92,8
	Sal Marinho (partículas grandes)	1,4

Fonte: modificada de Hess *et al.* (1998).

Tabela 2.4 – Parâmetros óticos de aerossóis em plumas regionais na região de queimadas.

Parâmetro ótico	Aerossóis “jovens”	Cuiabá (local)	Cuiabá (afastados)	Porto Velho	Marabá
α_s para $\lambda = 450\text{nm}$ (m^2/g)	5,0±0,5	4,1±0,9	4,8±1,0	4,4±0,9	3,8±0,7
α_s para $\lambda = 550\text{nm}$ (m^2/g)	3,2±0,5	2,9±0,7	3,8±0,8	3,5±0,7	2,9±0,6
α_s para $\lambda = 700\text{nm}$ (m^2/g)	1,75±0,3	1,6±0,3	2,2±0,5	2,0±0,4	3,8±0,7
β (1) para $\lambda = 450\text{nm}$	0,16±0,02	0,13±0,02	0,11±0,01	0,10±0,01	0,11±0,01
β (1) para $\lambda = 550\text{nm}$	0,18±0,01	0,15±0,02	0,12±0,01	0,11±0,01	0,13±0,01
β (1) para $\lambda = 700\text{nm}$	0,21±0,02	0,19±0,03	0,14±0,01	0,14±0,01	0,15±0,01
α_a para $\lambda = 550\text{nm}$ (m^2/g)	0,85±0,3	0,89±0,44	0,73±0,2	0,62±0,15	0,60±0,1
ω_0 para $\lambda = 550\text{nm}$	0,79±0,05	0,79±0,04	0,85±0,02	0,86±0,05	0,83±0,02
$\alpha_s^{(1)}$ para $\lambda = 450\text{nm}$ (m^2/g)	na	4,5±1,2	5,2±1,5	4,9±1,3	4,2±1,0
$\alpha_s^{(1)}$ para $\lambda = 550\text{nm}$ (m^2/g)	na	3,1±0,9	4,1±0,9	3,9±0,9	3,2±0,9
$\alpha_s^{(1)}$ para $\lambda = 700\text{nm}$ (m^2/g)	na	1,7±0,4	2,4±0,6	2,2±0,5	1,8±0,5

Fonte: Reid *et al.* (1998).

A hipótese era a de que os aerossóis de queimadas alteram suas características com bastante rapidez, em função de processos de conversão gás-partícula, de coagulação e condensação. Assim, o tempo de vida dos aerossóis apresenta um efeito importante em suas propriedades físicas, químicas e radiativas. Aerossóis com maior tempo de vida são maioria nas plumas regionais produzidas por queimadas.

Kotchenruther e Hobbs (1998) discutem a influência da umidade relativa do ar no espalhamento da radiação solar por aerossóis de queimada em quatro regiões do Brasil, incluindo cerrado e a floresta tropical, indicando que o aumento da umidade gera maior eficiência de espalhamento e diminuição da razão de retroespalhamento.

Eck *et al.* (1998) discutem a dependência das propriedades óticas com o comprimento de onda e afirmam que o albedo de espalhamento simples diminui com o aumento do comprimento de onda.

2.4. Sensoriamento remoto e os aerossóis atmosféricos

Apesar da distribuição global dos aerossóis já ser estimada por satélite desde a década de 70 (GRIGGS, 1975; FRASER, 1976), sensores específicos para a detecção dos mesmos só foram desenvolvidos nos anos 90. Os satélites TERRA e AQUA possuem a bordo o sensor MODIS, que, em conjunto, conseguem fazer varreduras em horários distintos do dia.

Assim como os aerossóis, a composição química da atmosfera também é foco de muitas pesquisas, por motivos similares. Em virtude disso, a NASA mantém uma constelação de satélites que possuem a bordo diversos sensores voltados para esse tipo de monitoramento, como o MOPITT (*Mensuraments of Pollution in the Troposphere*) que realiza medições de CO e CH₄ (Pan *et al.*, 1998); o ASTER (*Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer*), que gera imagens de altíssima resolução espacial de nuvens e da superfície terrestre (NADERI *et al.*, 1991); o CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), que mede nuvens e fluxo de radiação (WIELICKI *et al.*, 1998); o VIIRS (*Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite*), adquirindo dados em várias bandas espectrais, gera uma variedade de produtos aplicados, incluindo imagens no visível / infravermelha de furacões e detecção de incêndios, fumaça e aerossóis atmosféricos (VERMOTE *et al.*, 2002); além do já mencionado MIRS, que faz observações com diferentes ângulos de visada (DINER *et al.*, 1998). Os satélites Calipso e o CloudSat foram lançados em 2006, com o objetivo de realizar medições de perfis atmosféricos de aerossóis e nuvens através do uso de LIDAR (*Light Detection And Ranging*).

2.4.1. O sensor MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

O MODIS é um radiômetro espectral passivo, desenhado especificamente para as observações de aerossóis. Com uma largura de cobertura de observação de 2330 km, trata-se de um sensor suficientemente grande para realização de coberturas globais completas de um a dois dias (CASTANHO, 2005). A bordo dos satélites TERRA e AQUA, ele obtém, dentre outros parâmetros, campos instantâneos da profundidade óptica dos aerossóis sobre o continente e oceanos, estando em operação desde dezembro de 1999 e maio de 2002, respectivamente. O TERRA cruza o equador em direção ao sul às 13:00 UTC e o AQUA o faz, em sentido contrário, às 16:30 UTC.

São obtidas 36 bandas espectrais, entre os comprimentos de onda de 0,4 e 14,5 micrometros, com o sensor possuindo uma elevada razão sinal/ruído (>500). A irradiância absoluta possui um erro de $\pm 5\%$ para a banda de reflexão e $\pm 1\%$ para a banda de emissão, e Barnes *et al.* (1998) apresenta mais detalhes. O *bias* do MODIS está correlacionado positivamente com a cobertura de nuvens observada; Com o aumento de 10% para 60% de cobertura de nuvens, a diferença média de comparações MODIS-Aeronet aumenta em $\sim 15\%$; porém, esse bias não está correlacionado com nuvens em condições de elevada carga de aerossóis (LEVY *et al.*, 2010).

Os produtos desse sensor que são obtidos após seus processamentos são gerados em três níveis – Nível 1, Nível 2 e Nível 3 – sendo neste último nível geradas médias estatísticas dos produtos. O produto de aerossol Nível 2 é gerado diariamente, oferecendo, dentre outras propriedades, espessura óptica dos aerossóis, no oceano (TANRÉ *et al.*, 1997; 1999) e no continente (KAUFMAN *et al.* 1997), com resolução de 10 x 10 km (no nadir) distribuição de tamanhos sobre oceano e tipo sobre continente.

Hoelzemann *et al.* (2009), realizando comparações dos valores de espessura óptica obtidos pela rede AERONET e o sensor MODIS entre os anos de 2001 e 2007, afirmam que todas as regiões onde ocorre queima de biomassa tiveram um aumento da espessura óptica entre os meses de agosto e outubro, com um máximo em setembro. A espessura óptica observada nas grandes cidades é inferior àquela verificada nas regiões de queimada, mas o aumento foi igualmente bem representado pela AERONET e dados do MODIS.

Os dados obtidos pelo MODIS foram comparados com medições da AERONET em diversos estudos, buscando sua constante validação (CHU *et al.* 2002; ICHOKU *et al.* 2002; REMER *et al.* 2002; HOELZEMANN *et al.* 2009, entre outros). Apesar de ser uma ferramenta de extrema valia no que se refere à quantificação da cobertura global e variabilidade espacial dos aerossóis atmosféricos e representar um grande avanço na caracterização da variabilidade espacial dos aerossóis dentro do sistema climático, ainda existem problemas quanto aos dados aquisitados pelo sensor.

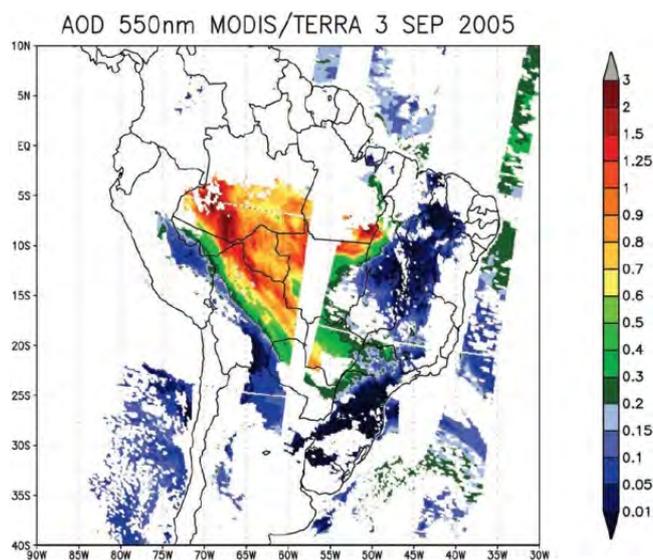


Figura 2.8 – Profundidade óptica dos aerossóis em 550nm, para o dia 03 de setembro de 2005.

Fonte: Hoelzemann *et al.* (2009).

A figura 2.9, apresentada por Rosário (2011), mostra uma climatologia mensal em termos da magnitude da profundidade óptica e da extensão espacial dos aerossóis. Os valores indicam que a região é basicamente dominada pela pluma associada à queima de biomassa, coerente com o regime de precipitação do continente, com aumento da espessura óptica entre os meses de agosto e outubro.

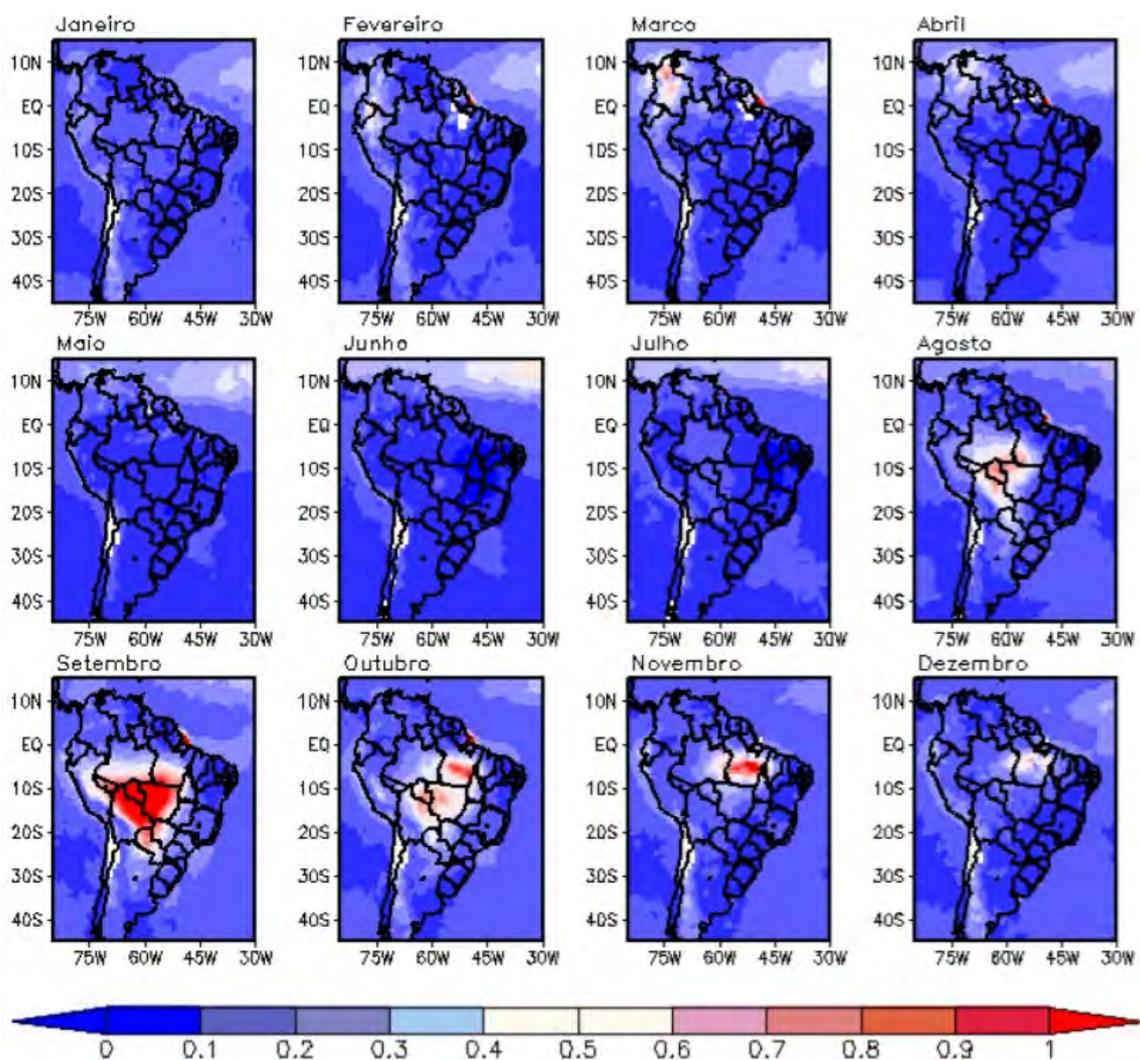


Figura 2.9 – Climatologia mensal da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm sobre a América do Sul, obtida a partir das medições do sensor MODIS a bordo do satélite TERRA entre os anos de 1999 e 2009.

Fonte: Rosário (2011).

Falando especificamente da América do Sul, há uma tendência dos dados do MODIS de superestimar a profundidade óptica em regiões de queimadas, durante determinados eventos extremos (LEVY *et al.*, 2010) e de subestimar a profundidade óptica quando o solo apresenta cor escura ou verde, como observado em parte da Amazônia, norte da Austrália e regiões onde o solo é avermelhado. Rosário (2011) menciona que a principal hipótese para estes valores é a representação não ideal das propriedades intrínsecas dos aerossóis de queimadas.

Rosário (2011) menciona ainda que as melhorias obtidas no aprimoramento dos modelos ópticos do MODIS para as queimadas na África em trabalhos como Ichoku *et al.* (2002; 2004) não apontam melhorias nos produtos de profundidade óptica dos aerossóis de queima de biomassa sul-americanos.

2.5. Rede mundial de monitoramento de aerossóis - AERONET

A rede AERONET é uma rede mundial de radiômetros coordenada pela NASA, no projeto EOS – *Earth Observing System* – para a aquisição e monitoramento de dados de aerossóis ao redor do mundo. Os dados são medidos e processados através de um protocolo único, bem como a calibração dos seus sensores (AERONET – NASA, 2008). O sensor utilizado pela rede é o radiômetro espectral CIMEL Eletronique 318A, sendo os dados disponibilizados na internet, no endereço <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>. Desde 2004, a CIMEL produz radiômetros com melhorias no sensor óptico, inclusive com processamento *onboard* (AERONET – NASA, 2008).

Realizando medidas diretas de radiação solar (incluindo irradiação global e difusa, PAR, UV-A, UV-B), obtém-se a espessura óptica das partículas de aerossol e a quantidade de vapor d'água precipitável na coluna atmosférica.

Também são obtidos parâmetros físicos das partículas na coluna atmosférica através de medidas de radiação difusa do céu, em conjunto com modelos de inversão (CASTANHO, 2005). Há a consideração, inclusive, de modelos de partículas não-esféricas (DUBOVIK *et al.*, 2002).

A AERONET realiza medições e disponibiliza dados de mais de 500 pontos de medição ao redor do mundo (sendo mais de 60 deles na América do Sul e mais de 40 no Brasil). O radiômetro CIMEL Eletronique 318A faz medições da radiação solar direta em oito comprimentos de onda – 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 (utilizado para a obtenção da coluna de água precipitável) e 1020 nm – a cada quinze minutos, sendo a atenuação da radiação direta de cada comprimento de onda utilizada para a obtenção da espessura óptica e do coeficiente de Angström. Ainda é considerada a atenuação por ozônio (LONDON *et al.*, 1976). A lei de Beer-Lambert-Bouguer é usada para a obtenção da espessura óptica dos aerossóis (HOLBEN *et al.*, 1998), sendo esta corrigida segundo Bucholtz (1995), que se baseia na atenuação pelo espalhamento Rayleigh.



Figura 2.10 – Radiômetro espectral CIMEL Eletronique 318A.

Fonte: CIMEL (2008).

Seguindo os padrões da rede AERONET, a calibração realizada garante uma precisão que varia de 1 a 3% na obtenção dos coeficientes. Porém, fatores como composição atmosférica e variação instrumental podem afetar a precisão das medições, sendo a incerteza da ordem de 10% e imprecisão de até 30%. Em virtude do pós-processamento dos dados, as medições são oferecidas em três níveis de confiança – 1.0, 1.5 e 2.0. Os produtos de nível 2.0 são inclusive corrigidos devido às diferentes calibrações de instrumentos, além de realizados procedimentos de limpeza de nuvens (contaminação das medidas) como descritos por Smirnov *et al.* (2000).



Figura 2.11 – Pontos de medição da rede AERONET na América do Sul.

Fonte: AERONET – NASA (2008).

2.6. Modelos de transferência radiativa

Diversos modelos computacionais foram desenvolvidos para a obtenção de estimativas de radiação solar incidente na superfície: GL, IGMK, Heliosat,

SUNNY-ALBANY, DLR, entre outros (CEBALLOS *et al.*, 2004; STUHLMANN *et al.*, 1990; DIEKMANN *et al.*, 1988; PINKER; EWING, 1985; GAUTIER *et al.*, 1980; TARPLEY, 1979; KERSCHGENS *et al.*, 1978; HAY; HANSON, 1978; RASCHKE, 1972, INEICHEN, 2008; PEREZ *et al.*, 2002). Esses modelos podem ser classificados em modelos estatísticos e modelos físicos.

Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas entre medidas de radiação incidente e condições locais e, portanto, apresentam validade restrita à região estudada. Já os modelos físicos são, em sua maior parte, válidos para qualquer região do planeta, uma vez que parametrizam os processos radiativos que ocorrem na atmosfera. A parametrização das interações entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos depende do conhecimento de parâmetros atmosféricos como a cobertura de nuvens e o perfil de constituintes como aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases encontrados na coluna atmosférica. O principal fator de modulação da radiação solar na superfície é a cobertura de nuvens (STUHLMANN *et al.*, 1990; PINKER; LASZLO, 1989; DEDIEU *et al.*, 1987; RAPHAEL; HAY, 1984; GAUTIER *et al.*, 1980).

Dentre os modelos citados acima, o Modelo GL também está em uso na América do Sul e foi operacionalizado no INPE em 2002. Sua primeira versão desenvolvida na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para imagens do canal visível (VIS) do Meteosat 4 (Ceballos; Moura 1997), sendo posteriormente adaptado para canal visível (VIS) do GOES por pesquisadores do INPE e UFPB (CEBALLOS *et al.*, 2004). Na sua versão 1.2, supõe a partição do espectro solar em dois intervalos espectrais de banda larga: ultravioleta + visível (UV + VIS) e o infravermelho próximo (IV). Utiliza valores de radiância medidos pelo satélite geoestacionário, adotando um conjunto de parâmetros atmosféricos: água precipitável, ozônio (O₃), dióxido de carbono (CO₂), refletância da superfície e das nuvens, assumindo que sua variabilidade sobre o Brasil não é significativa. Não são consideradas fontes de erro como a refletância não isotrópica de algumas superfícies, as propriedades de absorção do aerossol local. Mesmo com essas aproximações, o Modelo GL 1.2

apresenta desempenho compatível com outros publicados na literatura, com desvio médio mensal da ordem de $\pm 10 \text{ W/m}^2$ e desvio padrão dos dados mensais inferior a 20 W/m^2 , em condições de carga de aerossol fraca (CEBALLOS; BOTTINO, 2004). Uma nova versão, o GL 1.4, está em desenvolvimento na DSA/INPE.

Apesar da comprovada influência dos aerossóis na atenuação da irradiação solar, os modelos de transferência radiativa, de um modo geral, não costumam levá-los em consideração, ao menos no que diz respeito aos aerossóis emitidos na queima da biomassa e das megacidades. Alguns experimentos foram realizados em caráter de avaliação, como Martins e Pereira (2006), que implementaram uma parametrização de aerossóis para o BRASIL-SR visando aqueles resultantes da queima de biomassa na região da Amazônia. Essas integrações utilizaram dados de propriedades ópticas de três diferentes composições químicas de aerossóis, obtidos através do pacote OPAC (*Optical Properties of Aerosols and Cloud*) (HESS *et al.*, 1998), com perfis e trajetórias fornecidas pelo modelo de transporte de poluentes SMOKE (TROSNIKOV; NOBRE, 1998), juntamente com o modelo ETA. Foram obtidas melhorias nas estimativas da irradiância global em todas as estações utilizadas na validação, mas devido ao alto custo computacional, apenas 11 dias foram simulados. Essa implementação funcionou como uma primeira avaliação, visando o ganho nos resultados, para posterior uso operacional.

2.7. Espessura óptica dos aerossóis

A espessura óptica representa a potência de atenuação das moléculas, de um comprimento de onda específico da luz incidente (LIU, 1980). A espessura óptica dos aerossóis indica a eficiência de extinção de um determinado feixe de radiação solar pela matéria opticamente ativa, em um comprimento de onda específico.

A espessura óptica atmosférica é a contribuição da absorção devido aos diferentes gases, do espalhamento Rayleigh e do espalhamento e absorção por aerossóis. Ou seja, a espessura óptica de aerossóis é a diferença entre a espessura óptica atmosférica e a espessura óptica dos gases atmosféricos (SILVA, 2001).

2.7.1. Relação entre a visibilidade horizontal e espessura óptica dos aerossóis

A visibilidade horizontal é definida como a máxima distância a qual um observador pode discernir um objeto através de um determinado horizonte, sendo os critérios para observação adotados a partir de procedimentos da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1996).

Muitos estudos avaliam e buscam encontrar relações entre a profundidade óptica dos aerossóis e a visibilidade horizontal, já que há uma relação inversamente proporcional entre elas (ARANUVACHAPUN, 1983; VERMOTE *et al.*, 2002; JI *et al.*, 2011; NWOFOR, 2010; DZUBAY *et al.*, 1982; LARSON; CASS, 1989; SISLER; MALM, 1994 ELDERING *et al.*, 1994; HAND *et al.*, 2002, entre outros) sendo que alguns destes, inclusive, buscam relações empíricas entre elas.

Badarinath *et al.* (2004), buscando caracterização aerossóis de queima de biomassa na Índia, apresenta a fórmula de Deschamps *et al.* (1981) para a estimativa da visibilidade horizontal:

$$V = \frac{-15 \ln(AOT)}{0,613} \quad (2.11)$$

onde AOT é a espessura óptica dos aerossóis em um determinado comprimento de onda. Os autores mencionam que a visibilidade horizontal chega a 3,8 km durante períodos de queima de biomassa, quando nos períodos pré e pós queimada a visibilidade é de 10,7 km a 19,6 km.

Bäumer *et al.* (2008) apresentaram correlações de até 0,9 entre visibilidade horizontal medida e estimada a partir da equação 2.12, baseada na fórmula de Koschmieder e em valores de umidade relativa para o sudoeste da Alemanha, mas esta relação supõe que todo o aerossol da coluna estaria dentro de uma camada de mistura conhecida:

$$V = 3,912z_i AOT_{500}^{-1} \quad (2.12)$$

onde z_i é a altura da camada de mistura (conhecida e variando entre 1, 1,5 e 2 km) e AOT_{500} a profundidade óptica dos aerossóis em 500 nm.

Vermote *et al.* (2002) estabeleceram uma relação entre a visibilidade e espessura óptica dos aerossóis, para ser utilizada com os dados do *Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite* (VIIRS):

$$V = \frac{3,9449}{(AOT_{550} - 0,08498)} \quad (2.13)$$

onde AOT_{550} é a espessura óptica dos aerossóis em 550 nm. É importante observar que a relação não é válida para valores de espessura óptica dos aerossóis abaixo de 0,08498.

Retalis e Michaelides (2009) avaliaram estimativas de espessura óptica dos aerossóis medida pelo MODIS e estimada pela equação 2.13, através de dados de visibilidade horizontal. Verificaram elevada correlação, obtendo coeficientes de 0,80 a 0,82 e 0,80 a 0,84 para os satélites TERRA e AQUA, respectivamente. Retalis *et al.* (2010), visando a confirmação destas relações, avaliaram as estimativas de espessura óptica dos aerossóis através da

visibilidade horizontal, confrontando-as com a espessura óptica dos aerossóis obtida pelo sensor MODIS, com dados entre os meses de janeiro a junho na região de Cyprus. Obtendo correlações acima de 0,76, os autores concluem que as medidas de visibilidade podem ser usadas como fonte de informação de carga de aerossol atmosférico, fornecendo informações em tempo quase-real e validando assim a formulação de Vermote *et al.* (2002) para estimativas de visibilidade horizontal através da espessura óptica dos aerossóis e vice-versa.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1. O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico utilizado na obtenção de estimativas da irradiação solar incidente na superfície. Foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Renováveis e Bioenergia do CCST/INPE, em conjunto com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e teve como base o modelo alemão IMGK (STUHLMANN *et al.*, 1990). Utilizando a “aproximação de dois-fluxos” na solução da equação de transferência radiativa, o modelo faz uso de dados climatológicos (temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica) e elevação da superfície, além de outros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite. A cobertura de nuvens é considerada como principal fator de modulação da transmitância atmosférica, sendo também determinadas a partir de imagens de satélite geoestacionário (MARTINS, 2001). Após o tratamento dos dados climatológicos e das imagens de satélite, o modelo resolve a equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de “Dois-Fluxos” e faz o cálculo das componentes do fluxo de radiação solar.

3.1.1. Dados de entrada

Os arquivos com os dados de entrada são preparados através da base de dados climatológicos e do processamento das imagens de satélite para o período de execução, onde é obtida a cobertura efetiva de nuvens. A Figura 3.1 mostra os passos da sua preparação.

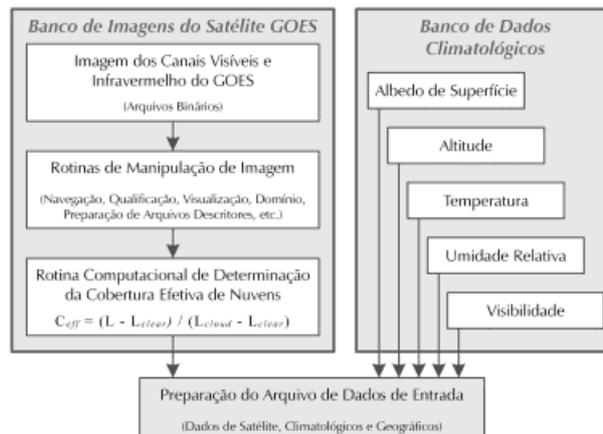


Figura 3.1 – Fluxograma da preparação do arquivo de dados de entrada do modelo BRASIL-SR.

Fonte: Pereira *et al.* (2006).

3.1.1.1. Dados climatológicos

Os dados de temperatura foram obtidos da base de dados do *Global Surface Summary of Day Data* (GSOD), desenvolvida e mantida pelo *National Climatic Data Center* (NCDC) sendo utilizadas 95 estações de medição no território brasileiro. Além dos testes de qualidade que os dados já são submetidos, durante o projeto SWERA, ainda foi realizada uma avaliação por um algoritmo que visava reconhecer problemas decorrentes do uso de sistemas de unidades diferentes e ruídos. Os dados coletados em campo foram utilizados para alimentar um método de interpolação por Kriging a fim de prover valores climatológicos de temperatura e visibilidade para a posição geográfica correspondente aos pixels das imagens do satélite GOES.

Já os dados de umidade relativa foram disponibilizados pelo *International Research Institute for Climate Prediction* (IRI), em médias mensais, com resolução horizontal de 2,5°. Assim como os dados de temperatura, também foram interpolados para a mesma resolução espacial das imagens do satélite

GOES, mas estes pelo método do vizinho mais próximo. As figuras 3.2 e 3.3 exibem os dados climatológicos de umidade relativa e temperatura, respectivamente.

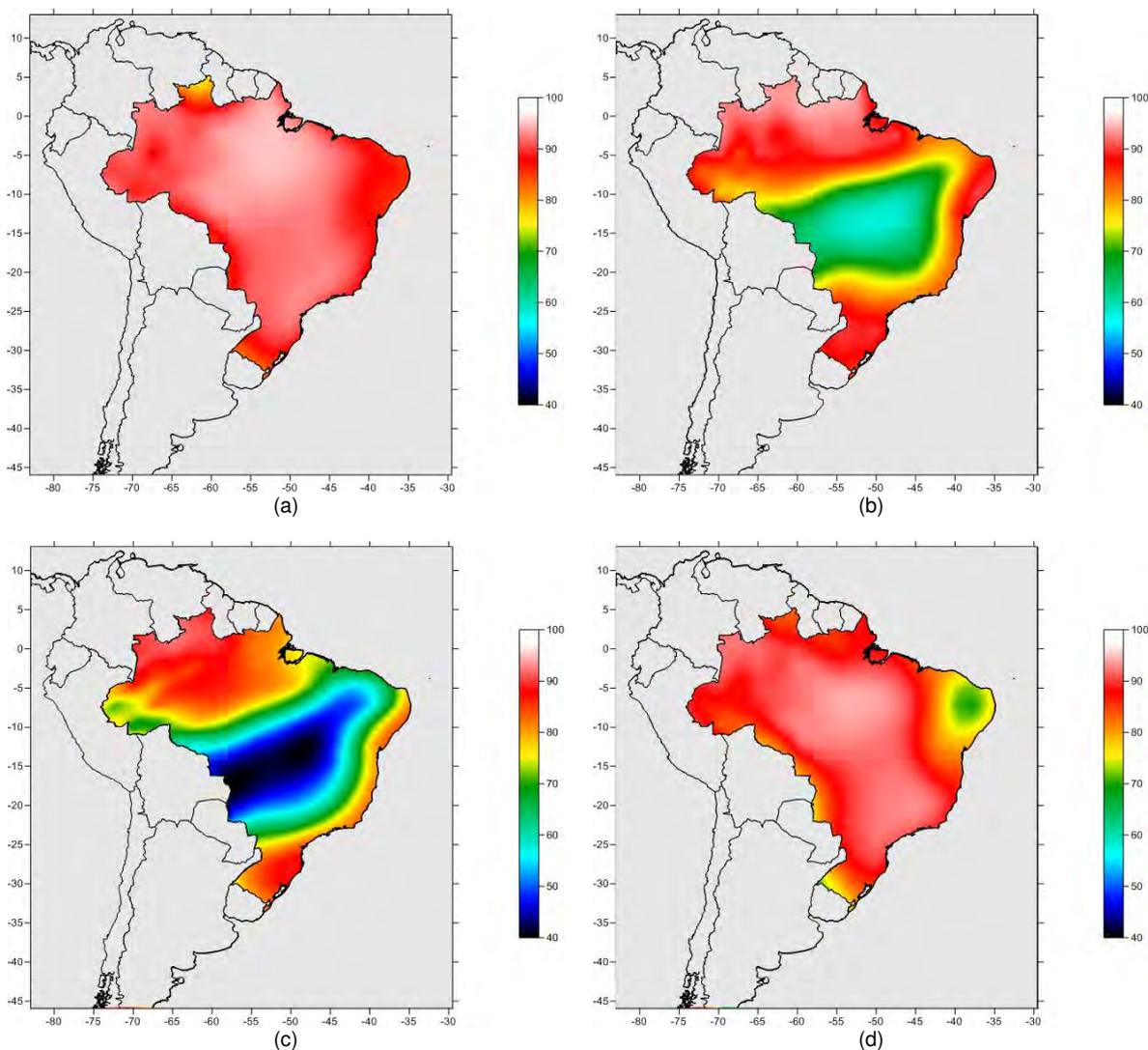


Figura 3.2 – Mapas de valores climatológicos de umidade relativa (%) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro(d) utilizados no modelo BRASIL-SR.

A base de dados de altitude do território brasileiro utilizada é a GTOPO30, do *Earth Resources Observation and Science (EROS) Data Center/United States Geological Survey (USGS)*, disponível em formato de grade com resolução de

arco de 30s (aproximadamente 1 km) e precisão do detalhamento topográfico da ordem de 100 m. Esta base é apresentada na figura 3.4.

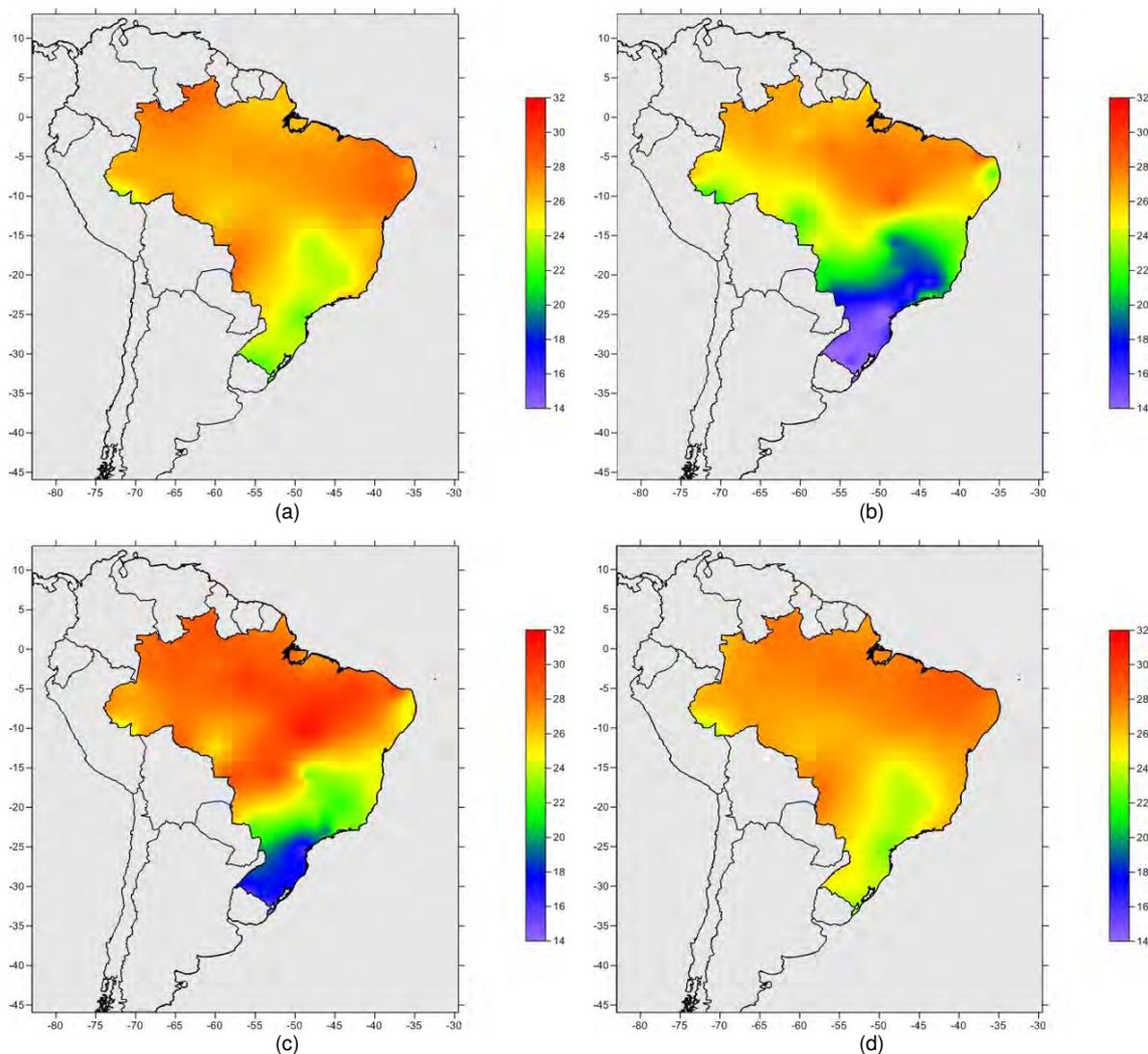


Figura 3.3 – Mapas de valores climatológicos de temperatura (°C) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) utilizados no modelo BRASIL-SR.

Os dados de albedo de superfície utilizados no BRASIL-SR são oriundos do modelo de Sellers *et al.* (1995), que calcula o albedo de superfície em vários intervalos espectrais, sendo alimentado por medidas de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) obtidas por satélite e outros parâmetros biofísicos relacionados ao tipo de vegetação. Esta base de dados é

disponibilizada pelo *Goddard Earth Sciences* – GES – em grades regulares de resolução horizontal de 1° e apresentada na figura 3.5.

Pereira *et al.* (2006) verificaram a confiabilidade dos resultados obtidos nas interpolações realizadas em razão da distribuição não-homogênea das estações de superfície no território brasileiro, encontrando boa concordância com os valores medidos mesmo nas regiões com menor densidade de estações (SILVA *et al.*, 2003).

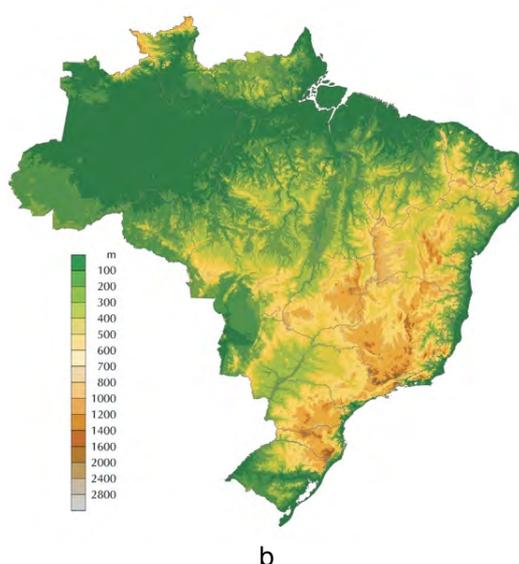


Figura 3.4 – Relevo utilizado no modelo BRASIL-SR.

Fonte: Pereira *et al.* (2006).

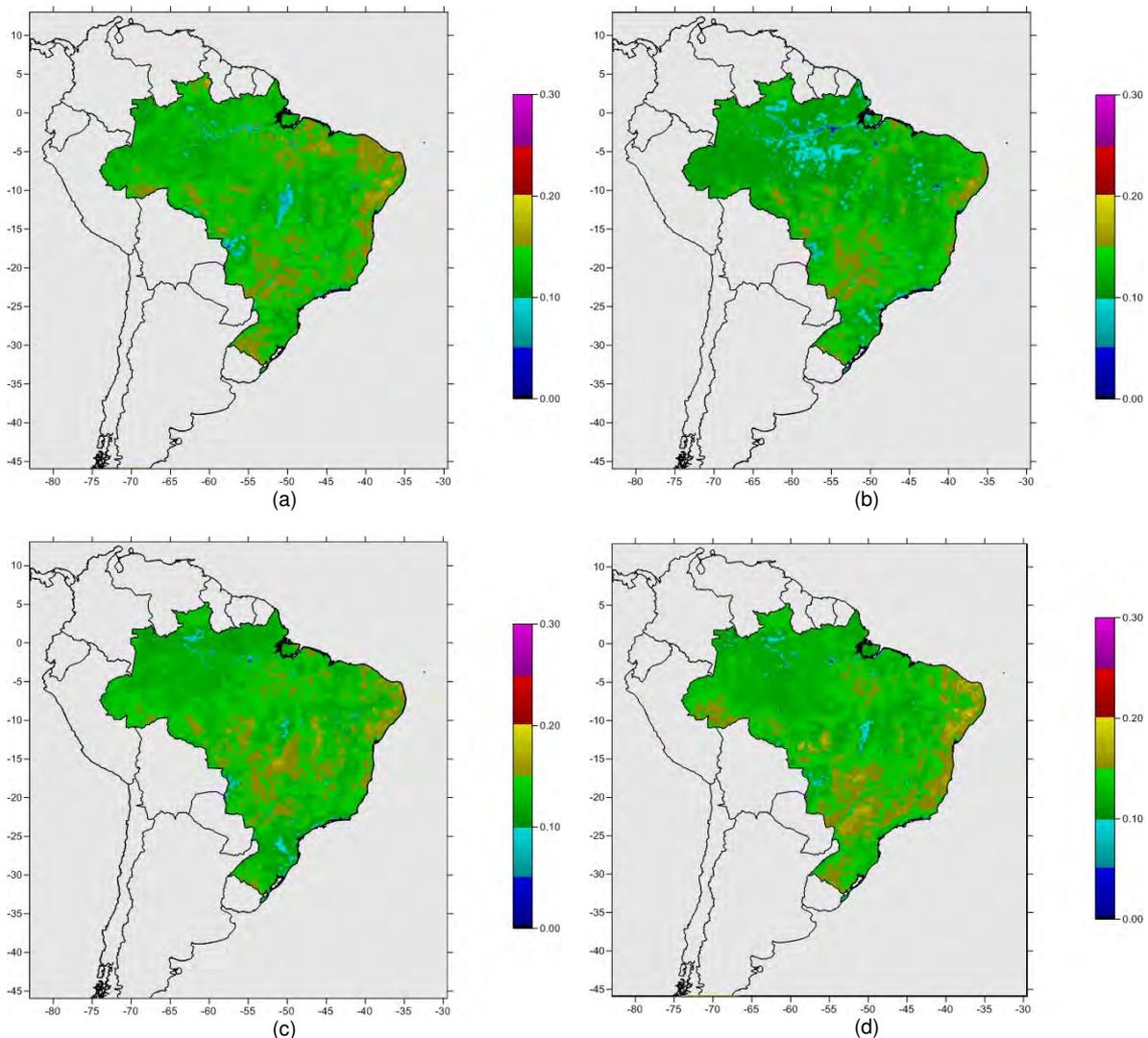


Figura 3.5 – Mapas de valores climatológicos de albedo para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) utilizados no modelo BRASIL-SR.

3.1.1.2. Parâmetros das imagens de satélite

Alguns parâmetros necessários para a resolução da equação da transferência radiativa, bem como a identificação das condições de céu claro e céu encoberto, são obtidos através da análise estatística das imagens do satélite GOES, passando por um processamento para qualificação e gerenciamento.

Condições de céu claro ou céu encoberto são identificados a partir de um algoritmo, que utiliza a relação entre as radiâncias dos canais infravermelho (10,2 – 11,2 μm) e visível (0,52 – 0,75 μm) medidas para cada pixel (MARTINS *et al.*, 2003). O coeficiente de cobertura efetiva de nuvens, C_{eff} , é função de uma relação linear entre condições de céu claro e encoberto, descrevendo informações sobre a distribuição espacial e espessura óptica das nuvens, sendo obtido pela equação 3.1:

$$C_{eff} = \frac{L_r - L_{clear}}{L_{cloud} - L_{clear}} \quad (3.1)$$

onde L_r é a radiância visível medida pelo canal 1 (0,52 – 0,75 μm) do GOES, L_{clear} e L_{cloud} são as radiâncias medidas no mesmo canal em condições de céu claro e encoberto. Os valores de L_{clear} e L_{cloud} são produzidos através de análises estatísticas de imagens do satélite GOES. Martins e Pereira (2006) mencionam que a confiabilidade de C_{eff} é um fator importante para a acurácia das estimativas solares.

3.1.2. Condições de contorno do modelo

O modelo BRASIL-SR assume que o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas - céu claro e céu encoberto (PEREIRA; COLLE, 1997; DIEKMANN *et al.*, 1988). Dessa forma, o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera é descrito pela equação 3.2:

$$\Phi_r = (1 - C_{eff})\Phi_{rClear} + C_{eff}\Phi_{rCloud} \quad (3.2)$$

onde Φ_r é a o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera; Φ_{rCloud} é o valor máximo de Φ_r atingido em condições de céu nublado e Φ_{rClear} é o valor mínimo de Φ_r atingido em condições de céu claro.

A equação (3.1) pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\Phi_m = \frac{\Phi_r - \Phi_{rClear}}{\Phi_{rCloud} - \Phi_{rClear}} = C_{eff} \quad (3.3)$$

onde C_{eff} é definido como o coeficiente de cobertura de nuvens e Φ_m é o fluxo normalizado de radiação no topo da atmosfera. O modelo considera a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera, de modo que se escreve:

$$\Phi_{gn} = 1 - \Phi_m \quad (3.4)$$

$$\Phi_g = (\Phi_{gMax} - \Phi_{gMin})(1 - C_{eff}) + \Phi_{gMin} \quad (3.5)$$

onde Φ_{gn} é fluxo normalizado de radiação solar incidente na superfície. Colle e Pereira (1998) realizaram estudo no Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR/UFSC), onde através de medidas de radiação solar realizadas na estação BSRN (*Baseline Solar Radiation Network*) localizada em Florianópolis, confirmaram esta relação. Assim, a equação (3.5) pode ser reescrita como:

$$\Phi_g = \Phi_0 \{ (\tau_{clear} - \tau_{cloud})(1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} \} \quad (3.6)$$

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. Dessa forma, a determinação da irradiância solar incidente na superfície é obtida através do cálculo das transmitâncias

atmosféricas nas condições de contorno; ou seja, condições de céu totalmente claro (Φ_{gMax}) e condições de céu totalmente nublado (Φ_{gMin}).

Para que ocorra a determinação do fluxo de radiação solar em outras condições de nebulosidade, o modelo utiliza o coeficiente de cobertura de nuvens, C_{eff} . As duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos ópticos que ocorrem na atmosfera, utilizando os dados climatológicos mencionados anteriormente. Assim, a componente de céu claro é obtida através do albedo de superfície, do ângulo zenital solar e da espessura ótica dos constituintes atmosféricos (inclusive os aerossóis). A componente de céu encoberto se torna função do ângulo zenital solar e da espessura ótica e altitude do topo das nuvens.

Para determinação das transmitâncias τ_{clear} e τ_{cloud} , o BRASIL-SR divide o espectro de radiação solar em 37 intervalos, e os subdivide em outros 135 subintervalos. A atmosfera é dividida em 30 camadas através de definição de 31 níveis de pressão, sendo a pressão na superfície definida em 1013,25 mb.

Os processos de interação considerados pelo modelo são: nuvens, espalhamento Rayleigh, absorção por gases atmosféricos (ozônio, dióxido de carbono e vapor d'água), e espalhamento Mie devido aos aerossóis. A espessura ótica de cada processo de interação é determinada a partir de perfis dos constituintes atmosféricos (ozônio, dióxido de carbono, vapor d'água, aerossóis) e características físicas da atmosfera (temperatura, espessura de cada camada e densidade do ar seco).

Um dos parâmetros utilizados para a determinação dos perfis atmosféricos é o tipo de atmosfera que é estabelecido a partir do valor da temperatura do ar na superfície (dado de entrada). O modelo permite a seleção entre 5 tipos de atmosfera-padrão – tropical, verão em latitudes médias, inverno em latitudes médias, verão e inverno sub-ártico.

Além do tipo de atmosfera, outras informações são necessárias para a estimativa de perfis de alguns constituintes atmosféricos; O perfil de CO₂ é calculado em função da pressão, da temperatura do ar e de uma concentração média de CO₂ na atmosfera.

Para determinação do perfil de vapor d'água, o modelo parametriza sua influência a partir da temperatura do ar na superfície e da quantidade de água precipitável presente na atmosfera, determinada através da relação empírica formulada por Leckner (1978):

$$w = \frac{0,493 R_h p_s}{T} \quad (3.7)$$

$$p_s = e^{(26,23-5416/T)} \quad (3.8)$$

onde R_h é a umidade relativa (dado de entrada do modelo), p_s é a pressão de saturação do vapor d'água e T é a temperatura do ar na superfície em Kelvin.

A equação (3.7) determina a água precipitável em condições normais de temperatura e pressão, já que os coeficientes de absorção utilizados no modelo foram descritos nestas condições. Martins (2001) realizou correções nesta parametrização, atualizando os valores de temperatura aplicados na equação (3.7) e no valor de pressão para a altitude local. O primeiro, através da curva adiabática úmida, entre os níveis de pressão do nível do mar (1013,25 mb) e da altitude da estação; já o segundo, corrigindo o valor de pressão atmosférica através da equação (3.9) (LUNDE, 1980):

$$P = P_0 e^{-(0,0001184z)} \quad (3.9)$$

Para determinar a absorção e espalhamento da radiação solar por nuvens, o modelo assume a existência de uma relação linear entre a cobertura efetiva de nuvens e a transmitância das nuvens (PEREIRA *et al.*, 1999, 1996; STUHLMANN *et al.*, 1990).

A parametrização de nuvens considera propriedades físicas como número de camadas atmosféricas com nebulosidade (assumindo que a cobertura de nuvens está restrita a um número fixo de camadas atmosféricas), distribuição de tamanhos de gotículas (selecionando entre oito tipos de distribuições de tamanhos disponíveis), tipo de nuvens (oito tipos de nuvens associados a cada uma das distribuições de tamanhos de gotículas), pressão atmosférica no topo da nuvem, conteúdo total de água líquida na nuvem (que é determinado pela distribuição de gotículas e nuvem selecionada).

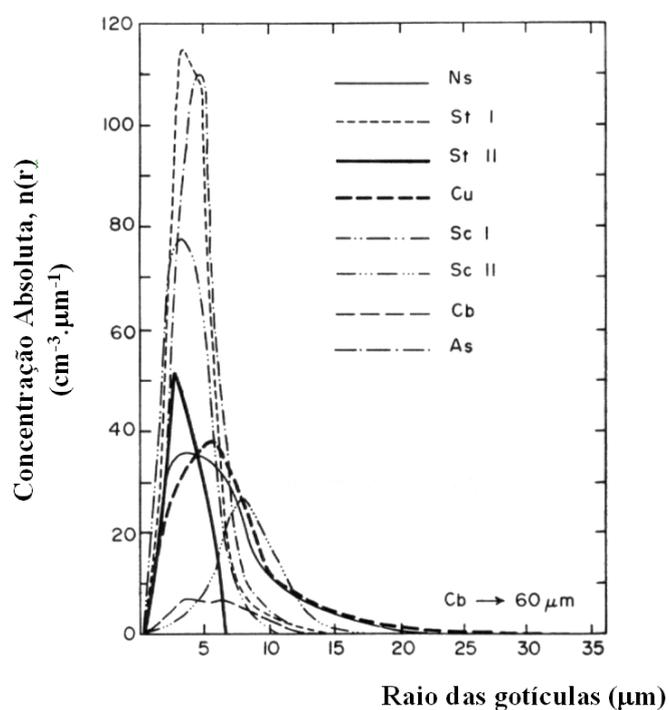


Figura 3.6 – Distribuição de tamanhos de gotículas tipos de nuvens parametrizados pelo BRASIL-SR.

Fonte: adaptado de Stephens (1978a).

É assumido que a cobertura de nuvens é devida a um único tipo de nuvem, adotando um número fixo de camadas atmosféricas com nuvens (duas camadas atmosféricas) e estabelece a pressão atmosférica no topo da nuvem em 500mb. Dessa forma, a altura da nuvem dependerá do perfil de pressão atmosférica estabelecido para o tipo de atmosfera selecionado a partir da

temperatura de superfície do local, o que reduz o tempo computacional do modelo.

A partir das informações de nebulosidade e de conteúdo de água precipitável na atmosfera, o modelo utiliza a parametrização de Stephens (1978 a, b) e as propriedades microfísicas do tipo de nuvem escolhida para determinar o coeficiente de extinção total da nuvem e seu conteúdo total de água líquida. Seu conteúdo é determinado a partir da pressão e temperatura das camadas atmosféricas onde as nuvens estão presentes e da distribuição de tamanhos das gotículas característico do tipo de nuvem.

A espessura ótica das nuvens em cada uma das camadas atmosféricas é determinada assumindo que o conteúdo total de água está isotropicamente distribuído nas camadas atmosféricas onde a nebulosidade esteja presente. O BRASIL-SR determina a massa ótica da nuvem em cada camada atmosférica e em seguida a multiplica pelo coeficiente de extinção associado ao tipo de nuvem selecionado. Estes coeficientes estão definidos no modelo para cada uma das oito distribuições de tamanhos e em 16 intervalos de comprimento de onda da radiação solar (MARTINS, 2001).

O conteúdo líquido de água presente e a distribuição dos tamanhos das gotículas são os fatores de maior influência nas propriedades óticas das nuvens (DEL GENIO *et al.*, 1996; STUHLMAN *et al.*, 1990; STEPHENS, 1978 a).

Dois perfis atmosféricos não estão relacionados com o tipo de atmosfera: perfil de aerossóis e o perfil de espalhamento Rayleigh. Um único perfil de espalhamento Rayleigh, na faixa de 0 a 50 km é adotado pelo modelo para cálculo da espessura ótica de espalhamento em cada camada atmosférica, independentemente do tipo de atmosfera estabelecido. Ele necessita apenas ser ajustado para a espessura de cada camada atmosférica, o que acaba sendo feito de acordo com a atmosfera selecionada pelo modelo, em função da temperatura do ar na superfície.

3.1.2.1. Parametrização de aerossóis

O modelo BRASIL-SR parametriza a concentração de aerossóis em cada camada atmosférica a partir de um perfil continental de aerossóis, que foi desenvolvido por McClatchey *et al.* (1972). Esse perfil é modificado nos primeiros 5 km, a partir de valores climatológicos de visibilidade ao nível do mar (LECKNER, 1978; SELBY; MCCLATCHEY, 1975). Esses valores estão estabelecidos em função do mês do ano e da latitude (entre 60° N e 60° S), concordando com valores determinados em outros estudos publicados (STUHLMANN, 1990). A visibilidade está restrita ao intervalo de 2 km a 150 km.

Estes valores são corrigidos de forma empírica, a fim de considerar sua variação dependente da elevação do solo, crescendo exponencialmente em função da altitude, até um valor máximo igual a 150 km. No caso destas correções produzirem visibilidades maiores que 150 km ou menores que 2 km, o modelo assumirá o valor limite mais próximo como a visibilidade do local.

A parametrização de absorção e espalhamento da radiação solar por aerossóis é baseada em Angström (1964), onde a transmitância para a radiação solar direta é calculada a partir da equação 3.10:

$$\tau_{a\lambda} = e^{(-k_{a\lambda}m)} = e^{(-\beta\lambda^{-\alpha}m)} \quad (3.10)$$

sendo $k_{a\lambda}$ é o coeficiente de atenuação dos aerossóis (absorção e espalhamento), β é o coeficiente de turbidez de Angström, α é o expoente de comprimento de onda, λ é o comprimento de onda da radiação solar e m é a massa ótica.

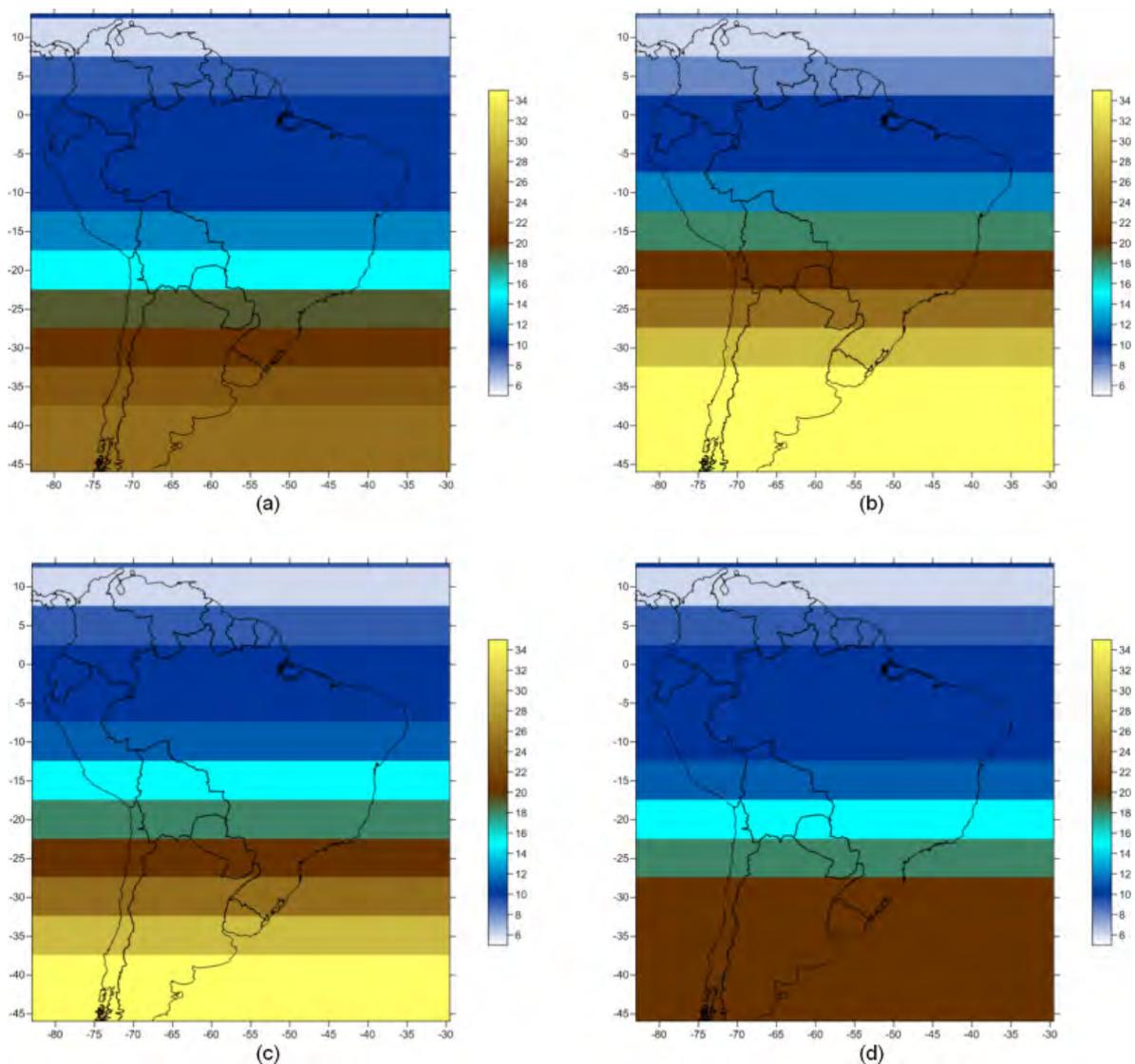


Figura 3.7 – Visibilidade horizontal climatológica (em km) desenvolvida por McClatchey *et al.* (1972), para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).

O coeficiente de turbidez de Angström é definido pela equação 3.11.

$$\beta = (0,55)^\alpha (3,912 / VIS - 0,01162) [0,02472(VIS - 5) + 1,132] \quad (3.11)$$

sendo VIS a visibilidade horizontal.

O produto $\beta\lambda^{-\alpha}$ da equação (3.10) é uma função da distribuição de tamanho das partículas, relacionada com a altitude em relação a superfície. São utilizados

três intervalos de altitude para a modelagem deste produto: altitudes menores que 2 km, altitudes entre 2 km e 10 km e altitudes maiores que 10 km. A parametrização de aerossóis adotada é bastante simplificada e insuficiente para caracterizar a variabilidade e importância dos aerossóis para a ótica atmosférica. Um único perfil de aerossóis é insuficiente para caracterizar a diversidade e as condições atmosféricas de regiões diferentes como áreas agrícolas e áreas urbanas (MARTINS, 2010).

Além disso, os valores climatológicos de visibilidade descritos anteriormente e utilizados na correção do perfil de aerossóis baseiam-se em uma quantidade reduzida de observações e para muitas latitudes foi necessária a interpolação de valores, uma vez que não existiam dados experimentais publicados (STUHLMANN, 2000). Também é importante mencionar que as observações rotineiras de visibilidade têm uma carga de subjetividade, podendo apresentar grandes imprecisões (LECKNER, 1978); Além disso, a correção empírica aplicada à visibilidade em função da altitude da estação pode não ser válida globalmente.

Em resumo, as parametrizações utilizadas para simular a interação dos aerossóis com a radiação solar são simplificadas e insuficientes para caracterizar as variadas condições atmosféricas e diferentes usos do solo. Porém, deve-se ter em mente que os estudos anteriores indicaram que as estimativas de radiação foram satisfatórias em condições de céu claro, ou onde não existiam fontes antrópicas significativas de aerossóis. Estimativas para grandes regiões urbanas, ou para regiões de ocorrência de queimadas, que possuem condições fora das médias climatológicas de visibilidade apresentam desvios elevados, podendo atingir valores de até 60% (MARTINS, 2001). Um resumo de todos os processos parametrizados pelo BRASIL-SR é apresentado na figura 3.8.

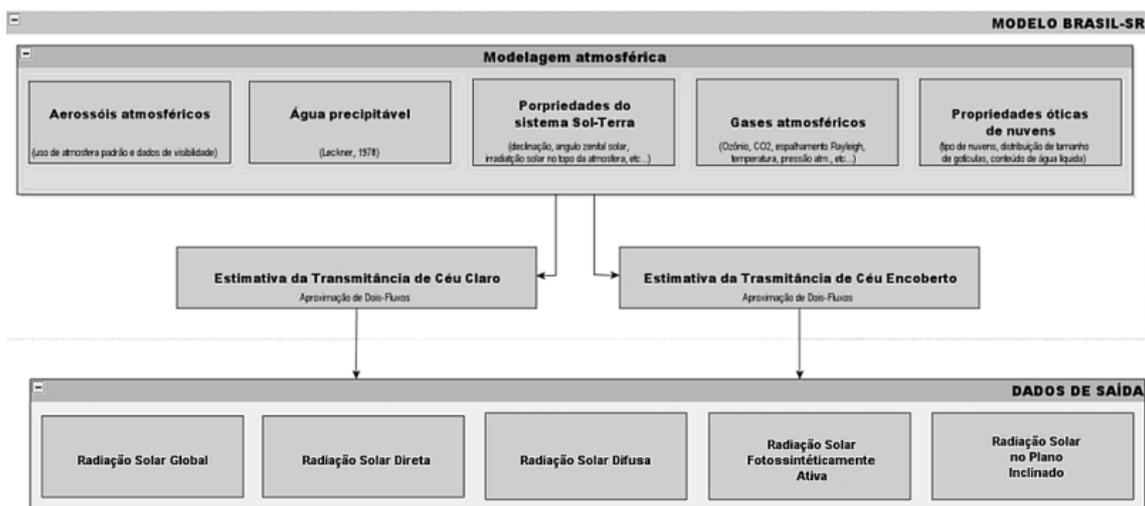


Figura 3.8 – Resumo das parametrizações realizadas pelo modelo BRASIL-SR.

3.2. O modelo CATT-BRAMS – *Coupled Aerosol and Tracer Transport to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System*

Dentre os modelos de transporte de poluentes em uso no Brasil, destaca-se o CATT-BRAMS, executado operacionalmente pelo CPTEC/INPE, sendo os seus resultados disponibilizados em <http://meioambiente.cptec.inpe.br/>. Este modelo é um acoplamento seguindo a metodologia proposta por Freitas (1999), entre o modelo euleriano de transporte químico CATT e o modelo de mesoescala BRAMS, adaptação do modelo RAMS – *Regional Atmospheric Modeling System* (PIELKE *et al.*, 1992; COTTON *et al.*, 2003) para as condições tropicais brasileiras.

O CATT-BRAMS explora a capacidade de transporte de traçadores do modelo BRAMS seguindo a aproximação euleriana, resolvendo a equação de conservação de massa para o monóxido de carbono (CO) e material particulado PM_{2.5}, na qual a razão de mistura do traçador, s (ρ/ρ_{air}), é calculada utilizando a equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{adv} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{PBL_{urb}} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{deep_{conv}} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{swallow_{conv}} + W_{PM_{2.5}} + R + Q \quad (3.12)$$

onde W contabiliza a remoção convectiva úmida do $PM_{2.5}$, R é um termo de subsidência associado com processos de remoção/transformação dos traçadores (deposição seca do $PM_{2.5}$ e transformação química do CO), e Q é o termo fonte de emissão associada ao processo de queima de biomassa.

Como pode ser observado na equação 3.12, também são considerados os efeitos da convecção úmida e da convecção profunda na distribuição dos traçadores. As parametrizações levam em consideração a subsidência ambiente e o entranhamento através dos transportes verticais ascendentes e descendentes de massa. O transporte vertical ascendente faz com que os aerossóis da camada limite cheguem até a alta troposfera, enquanto o transporte descendente consegue trazer ar limpo da troposfera livre para a camada limite (FREITAS *et al.*, 2005). Já a convecção rasa somente transporta as partículas de aerossóis e gases da camada limite para a baixa troposfera.

O transporte de sub-grade associado com o transporte convectivo raso e profundo é agregado com o esquema de cumulus de Grell e Devenyi (2002). Para o $PM_{2.5}$, o esquema de transporte convectivo de traçadores também contabiliza a remoção úmida (abaixo das nuvens) baseado no trabalho de Berge (1993). Também são fornecidas informações sobre outros poluentes (CO_2 , CH_4 e NO_x), mas estes não são diretamente o foco de interesse deste trabalho.

A remoção úmida dos aerossóis é associada à convecção profunda e a remoção seca é modelada com base no conceito de resistência, de maneira acoplada às parametrizações de superfície do BRAMS.

Parametrizações adicionais de radiação, que levam em conta a interação entre os aerossóis e radiação de onda curta e de onda longa, são implementadas no

CATT-BRAMS através de uma versão modificada do CARMA - *Community Aerosol and Radiation Model for Atmospheres* (TOON *et al.*, 1989), que passou a assimilar os campos meteorológicos e de PM_{2.5} do próprio modelo. O CARMA resolve a transferência radiativa nos dois espectros, solar e terrestre, e assim incorpora efeitos radiativos dos aerossóis (LONGO *et al.*, 2006). A dependência espectral das propriedades ópticas das partículas é prescrita a partir de tabelas de dados.

As fontes de emissão de gases e partículas são parametrizadas e introduzidas no modelo, sendo os arquivos com a informação das emissões gerados em um pré-processador, resultado dos estudos de Freitas (1999). Para o caso das emissões do CO₂, CH₄ e NO_x e PM_{2.5}, são baseadas nos produtos de queimadas do GOES WF_ABBA (PRINS *et al.*, 1998) (disponíveis em <http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/burn/abba.html>) e nas observações dos produtos do AVHRR e MODIS, disponibilizadas pelo CPTEC-INPE em <http://www.inpe.br/queimadas/>, além das observações de campo. Para cada queimada detectada por sensoriamento remoto, é calculada uma quantidade de massa emitida; então, dentro do modelo, um ciclo diurno (uma taxa de emissão) é parametrizado.

O tipo de vegetação é obtido através do mapa de vegetação do IGBP-INPE, com 1 km de resolução (<http://edc2.usgs.gov/glcc/glcc.php> e <http://proveg.cptec.inpe.br/>). As fontes de material particulado são temporal e espacialmente distribuídas e diariamente assimiladas de acordo com os pontos de queimadas definidas pelas observações de satélites, adicionando os dados de emissão do EDGAR (*Emission Database for Global Atmospheric Research*) 3.0 “*agricultural waste burn*” e “*fuelwood burning*” (mais detalhes podem ser verificados em <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/index.php>), com resolução horizontal de 1° x 1° e temporal de um ano e do RETRO (*Reanalysis of the Tropospheric chemical composition over the past 40 years*), que possui resolução horizontal de 0,5° x 0,5°. Para o continente africano, as emissões de queima são definidas apenas pelo EDGAR 3.0. Os mesmos bancos de dados,

também provêm as emissões de CO associadas aos processos antropogênicos, com correções da CETESB para a região metropolitana de São Paulo (CETESB, 2002).

O modelo é configurado para execução com três grades, de resolução horizontal de 150 km, 30 km e 15 km. Sua resolução vertical tem início a 150 m acima da superfície, se estendendo a uma taxa de 1,15, até uma resolução final de 850 m, com o topo do modelo a aproximadamente 20 km. A grade maior, cobrindo os continentes da América do Sul e da África, tem como finalidade gerar o fluxo de traçadores que vêm da África à América do Sul. O modelo atmosférico é inicializado e ajustado com as análises/previsões do modelo global do CPTEC, que tem resolução horizontal de 1,875 graus e temporal de 6 horas. Os campos em três dimensões da concentração dos traçadores das simulações anteriores são usados como condição inicial para a próxima e uma condição de fluxo constante é usada como condição de contorno, para os traçadores na grade maior. As simulações são realizadas para 48 horas, sempre começando às 00 UTC do dia anterior e a umidade do solo é inicializada com base no método de índice de precipitação antecedente (GEVAERD; FREITAS, 2003). As comparações dos resultados do modelo com resultados de aerossol de sensoriamento remoto (como mostrado na figura 3.9), além de medições diretas de produtos de gases-traço demonstraram bons índices de previsibilidade deste método.

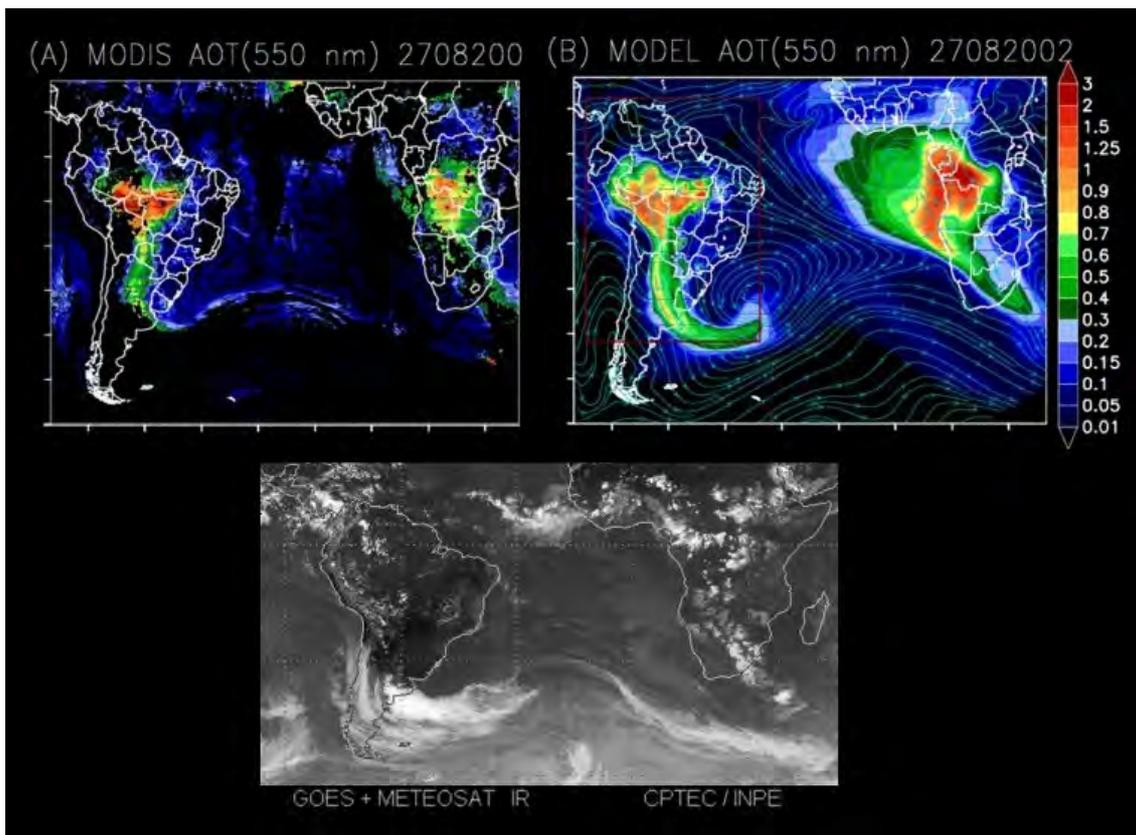


Figura 3.9 – Comparação da espessura óptica dos aerossóis em 550nm obtida pelo sensor MODIS e pelo modelo CATT-BRAMS.

Fonte: Meio Ambiente, 2012.

3.2.1. Estimativa da visibilidade horizontal a partir da espessura óptica dos aerossóis

Neste trabalho, foram utilizadas as análises do modelo CATT-BRAMS para os meses de março, junho, setembro e dezembro dos anos de 2006 a 2008, para se obter os valores médios mensais de espessura óptica dos aerossóis. A partir destes valores, foram gerados valores médios de visibilidade horizontal mensal, através da formulação proposta por Vermote *et al.* (2002) e apresentada na equação 2.13. Assim, o modelo BRASIL-SR utilizou a condição de visibilidade

média estimada através da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm, do CATT-BRAMS, para os períodos em questão.

3.3. Adequação da base de visibilidade horizontal

Para a adequação da base de visibilidade horizontal utilizada pelo modelo BRASIL-SR, foram utilizados dados diários e horários oriundos de mensagens METAR, observados nos anos de 2006 a 2008 em 105 aeroportos na América do Sul. A localização das estações está apresentada na figura 3.10.

Dentre estes dados, dois conjuntos diferentes estão disponíveis para o desenvolvimento deste trabalho; 28 estações dispunham de valores horários de visibilidade horizontal, temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho e informação de tempo presente; e para as demais 77 apenas valores diários médios, máximos e mínimos de visibilidade horizontal e umidade relativa estavam disponíveis. Em função disso, há a necessidade de desenvolver procedimentos específicos para o tratamento e manipulação dos valores, em conformidade com os dados disponíveis em cada estação.

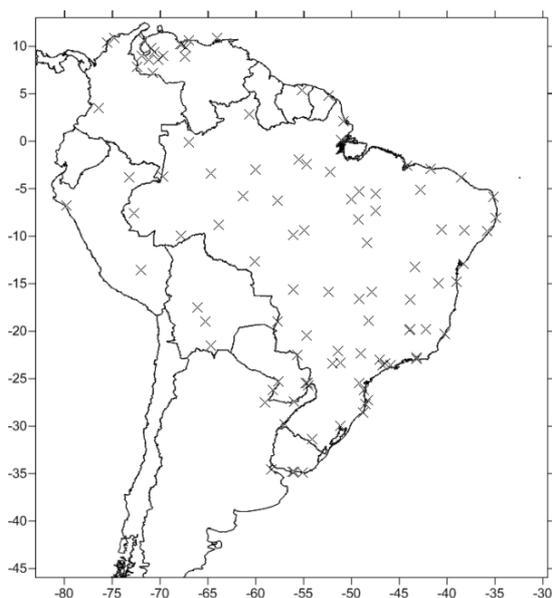


Figura 3.10 – Localização das estações utilizadas na atualização da base de visibilidade horizontal a ser utilizada no modelo BRASIL-SR.

Em ambos os casos, a metodologia foi baseada nos critérios utilizados por Husar *et al.*, (2000), para identificar valores de visibilidade horizontal que estivessem relacionados com aerossóis atmosféricos.

Para garantir a consistência dos dados e arranjá-los de forma que eles possam ser processados pelo modelo BRASIL-SR, foram executadas as seguintes etapas:

- Exclusão de registros contaminados por hidrometeoros: eliminação de valores de baixa visibilidade associados a fenômenos meteorológicos como neblina ou precipitação, e não à presença de aerossóis;
 - Eliminação de registros onde a média diária da umidade relativa fosse igual ou superior a 90% (no caso dos dados diários) e exclusão dos registros onde a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho fosse inferior que 2,2 ° C (para o caso dos dados horários).

- Eliminação de registros de visibilidade horizontal relacionados com as condições de tempo, sendo a eliminação de valores espúrios de visibilidade horizontal (*spikes*) realizada através do seu confronto com o campo de informação do tempo presente. Utilizando o campo de tempo presente, manteve-se apenas valores de visibilidade horizontal coerentes com situações de névoa seca (*dry fog*) para a base de dados horária. No caso dos dados diários, o registro é mantido se o valor de umidade relativa máxima for menor ou igual a 75%.
- Também foram utilizados critérios para eliminação de estações com suspeita de problemas técnicos. Por exemplo, estações onde a visibilidade apresentou-se baixa e constante por muitos dias; estações que possuam grandes diferenças quando comparadas à outras localizadas nas proximidades; estações que apresentaram, repentinas alterações nos valores de visibilidade. Esse último filtro, porém, deve ser utilizado com mais cautela (como por exemplo, realizar comparações com estações próximas), já que são concebíveis alguns padrões anômalos como resultado dos atuais picos de concentração de aerossóis de atividades antrópicas.

Após a implementação destes critérios de consistência, outras rotinas computacionais foram desenvolvidas e utilizadas para determinar as médias mensais utilizadas para a confecção dos mapas de visibilidade horizontal para o território brasileiro.

Em virtude da maneira como as estações estão distribuídas no território Sul-Americano, foi utilizado o método de interpolação por Kriging, a fim de obter uma grade regularmente espaçada. Para fins de uso no modelo BRASIL-SR, a resolução espacial foi de $0,125^{\circ} \times 0,155^{\circ}$, idêntica à resolução espacial das imagens do satélite geoestacionário.

3.4. Comparação das simulações com dados medidos em superfície

Para efeitos de comparação das simulações com diferentes bases de visibilidade horizontal, as estimativas de irradiação global, direta e difusa foram confrontadas com dados medidos em superfície, oriundos de estações da rede SONDA e de piranômetros da rede AERONET. Em função da disponibilidade de instrumentos, bem como das respectivas operacionalidades, não foram realizadas comparações de todos os parâmetros em todo o período simulado. A localização das estações no território brasileiro é apresentada na figura 3.11, e suas coordenadas e tipos são apresentados na tabela 3.1.

Os valores estimados e medidos foram comparados graficamente em diagramas de dispersão e em suas séries diárias, para permitir uma análise visual da relação entre os valores estimados e medidos.



Figura 3.11 – Localização das estações utilizadas nas avaliações das estimativas do modelo BRASIL-SR.

Tabela 3.1 – Coordenadas das estações utilizadas nas avaliações das estimativas.

Estação	Coordenadas	Tipo
1 – Ji-Paraná (RO)	61,85 W 10,93 S	Aeronet
2 – Alta Floresta (MT)	56,10 W 9,87 S	Aeronet
3 – Cuiabá (MT)	56,06 W 15,55 S	SONDA
4 – Palmas (TO)	48,35 W 10,15 S	SONDA
5 – São Luiz (MA)	44,21 W 2,60 S	SONDA
6 – Natal (RN)	35,21 W 5,85 S	SONDA
7 – Petrolina (PE)	40,31 W 9,05 S	SONDA
8 – Brasília (DF)	47,72 W 15,60 S	SONDA
9 – Campo Grande (MS)	54,53 W 20,40 S	SONDA
10 – Ourinhos (SP)	49,88 W 22,95 S	SONDA
11 – Florianópolis (SC)	48,53 W 27,60 S	SONDA
12 – São Martinho da Serra (RS)	53,81 W 29,45 S	SONDA

Juntamente com as comparações visuais, a performance das simulações também foi avaliada através de índices comumente empregados na literatura:

- Coeficiente de Correlação de Pearson (R): trata-se de uma medida adimensional de associação linear entre as estimativas e os dados medidos; varia de -1 a 1, sendo a estimativa ideal aquela que atinge o valor 1. Definido pela equação 3.13:

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - \bar{E}}{S_E} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{S_O} \right) \quad (3.13)$$

em que E e O são as estimativas e os dados observados; S_E e S_O são os desvios padrões das estimativas e dados medidos; \bar{E} e \bar{O} são as médias das estimativas e dados medidos e N é o número de dados observados e suas estimativas.

- Viés ou Erro Sistemático Médio: é uma média dos erros obtidos entre as estimativas e os dados medidos e permite verificar se há uma tendência do modelo em subestimar ou superestimar seus resultados. Seu valor

ideal é zero e possui a mesma unidade das estimativas / dados medidos. Definido pela equação 3.14:

$$viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i) \quad (3.14)$$

em que E e O são as estimativas e os dados observados e N é o número de dados observados e suas estimativas.

- Raiz do Erro Quadrático Médio ($RMSE$): trata-se de uma medida da magnitude média dos erros das estimativas, variando de 0 a infinito, mas com valor ideal igual a zero. Definida pela equação 3.15.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2} \quad (3.15)$$

em que E e O são as estimativas e os dados observados e N é o número de dados observados e suas estimativas.

O viés e o RMSE foram, ainda, apresentados em termos de erros relativos, destacando a simulação que teve melhores resultados em comparação com a simulação referência (simulação utilizando as médias climatológicas de visibilidade horizontal), ou, caso a simulação referência tenha apresentado menores diferenças dos dados medidos, aquela que mais se aproximou deste valor.

4 RESULTADOS

4.1. Caracterização ambiental do território brasileiro no período de estudo

Em virtude de sua grande extensão territorial, o Brasil consegue experimentar regimes climáticos bastante distintos. Uma das consequências dessa grande variabilidade é a diversidade de sistemas sinóticos, criando peculiaridades em cada uma das regiões brasileiras e influenciando os regimes de precipitação de cada uma delas.

A estação seca na maior parte do território brasileiro tem início entre os meses de abril e maio, estendendo-se até os meses de setembro e outubro. A estação chuvosa, por sua vez, tem início entre outubro e novembro e termina entre março e abril. Exceções são a costa leste da região Nordeste (com estação chuvosa entre abril e agosto) e o litoral da região sul (junho a setembro). É justamente durante a estação seca que o número de queimadas aumenta em razão das condições propícias para as queimas de origem natural.

As análises serão focadas nos meses de março, junho, setembro e dezembro entre os anos de 2006 e 2008. Para esses meses foram realizadas as simulações com distintas bases de visibilidade horizontal, adequadas à variabilidade sazonal das condições ambientais no período de estudo no território Brasileiro.

As informações foram obtidas, em sua maioria, de Boletins do Climanálise correspondentes aos períodos analisados e através das informações disponibilizadas de focos de queima disponibilizados pela DSA/INPE.

4.1.1. Descrição meteorológica e focos de queima detectados - 2006

O primeiro trimestre do ano de 2006 foi marcado pela ocorrência de chuvas típicas de verão no Norte, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Houve irregularidade na distribuição espacial e temporal das chuvas na Região Sul e precipitação abaixo da média climatológica em quase toda a região Nordeste. Foram registrados eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que influenciaram esses valores de precipitação – em especial no mês de março.

O trimestre abril-maio-junho marcou o início da estação seca no Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, que registraram valores dentro e abaixo da normal climatológica. O extremo norte do país apresentou algumas situações de chuva extrema, associadas a ZCIT, mas a região também entrou na sua estação seca neste trimestre. A região Nordeste apresentou totais de precipitação acima da média histórica. Em junho, as chuvas estiveram entre normal e abaixo da média histórica em grande parte do Norte, Centro-Oeste, Sudeste e quase toda a região Sul.

Os meses de julho - agosto - setembro apresentaram valores de precipitação abaixo da média histórica em quase todo o país. A influência de uma massa de ar quente no Centro-Oeste e Sudeste do Brasil foi responsável por parte desta diminuição, além de altos valores de temperatura máxima e baixos valores de umidade relativa. Ao longo do mês de setembro, houve o início da estação chuvosa e eventos de precipitação extrema no leste do Nordeste e na região Sul.

O último trimestre do ano foi caracterizado por chuvas acima da média histórica na maior parte do Brasil, inclusive na região Nordeste, onde historicamente chove pouco nesse período. Foram caracterizados episódios de ZCAS, que contribuíram para totais elevados de precipitação no Centro-Oeste e Sudeste

do país. Porém, no mês de dezembro, os totais pluviométricos do extremo norte do país estiveram bem abaixo das médias climatológicas. A precipitação esteve acima da média histórica na maior parte das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e dois episódios de ZCAS ocorreram ao longo de todo o mês, com a organização de bandas de nebulosidade entre o Sudeste e o Centro-Oeste do Brasil.

Foram registrados pela DSA/INPE neste ano um total de 117727 focos de queima de biomassa, sendo 908 destes no mês de março; 3148 em junho; 37286 em setembro e 8013 em dezembro. A localização destes focos pode ser verificada na figura 4.1.

4.1.2. Descrição meteorológica e focos de queima detectados - 2007

O primeiro trimestre do ano de 2007 foi caracterizado por totais de precipitação elevados nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. O mês de janeiro esteve entre os cinco mais chuvosos dos últimos 50 anos nessas regiões, com a influência de eventos de ZCAS. Nas regiões Sul, Nordeste e Norte os valores de precipitação estiveram dentro e abaixo da média climatológica. Em março, houve a atuação de uma massa de ar seco sobre grande parte da América do Sul e apenas um episódio de ZCAS.

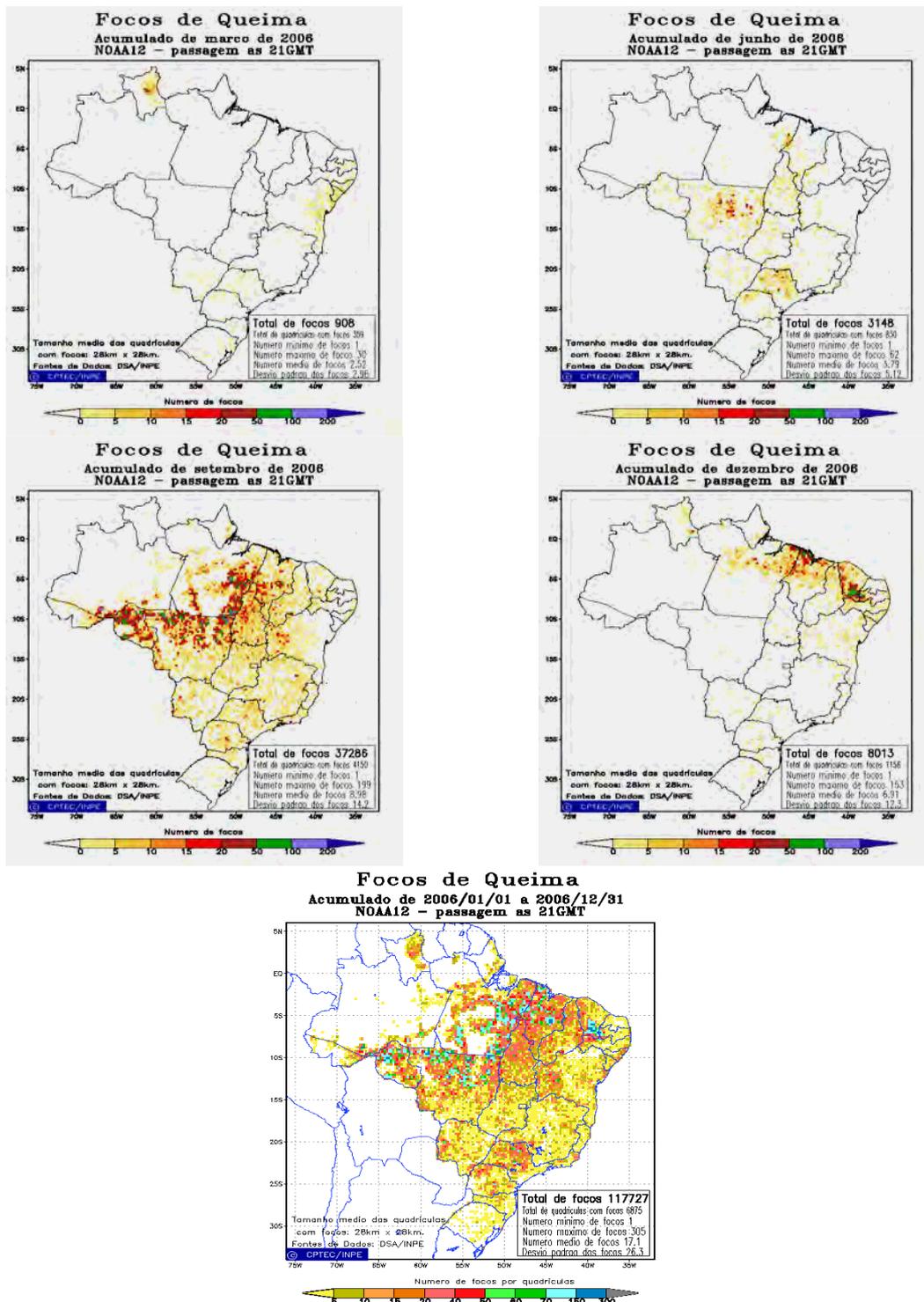


Figura 4.1 – Focos de queimadas identificados no ano de 2006.

Fonte: DSA/INPE.

O segundo trimestre teve o registro de valores de precipitação abaixo da média climatológica em quase todo o Nordeste, mas foram observados eventos extremos de precipitação associados a vórtices ciclônicos em altos níveis e distúrbios ondulatórios de leste, inclusive com perdas materiais e humanas. Caracterizou-se o início da estação seca no Sudeste e Centro-Oeste, com valores abaixo da média climatológica. Estes baixos valores também foram registrados na região Sul. Valores acima da média climatológica apenas no noroeste do país. Nos meses de maio e junho houve a persistência de massas de ar seco que afetaram as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste, com valores de temperatura máxima até 5º C acima da média climatológica.

O terceiro trimestre do ano de 2007 continuou apresentando totais pluviométricos dentro ou abaixo da média histórica, nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e no norte do Sudeste. Eventos de precipitação extrema no Sudeste e na porção centro-norte da região Sul, originados por sistemas frontais e a cavados em médios e altos níveis, mantiveram os valores na região próximos às médias climatológicas nessas regiões. No início de setembro predominou uma intensa circulação anticiclônica na baixa troposfera, que contribuiu para a escassez de chuvas na maior parte do Brasil, com baixos índices de umidade relativa do ar ocorrendo principalmente na Região Centro-Oeste.

O último trimestre de 2007 teve início sob influência de um escoamento anticiclônico na porção leste da América do Sul, ocasionando chuvas abaixo da média histórica em parte do Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste do Brasil. Algumas áreas do Sudeste, Norte e do Centro-Oeste registraram anomalias positivas de precipitação, devido a eventos de ZCAS. As incursões de sistemas frontais mantiveram as chuvas na região Sul dentro das médias climatológicas. O posicionamento da Alta da Bolívia foi o responsável pelos valores positivos na região Norte. Em dezembro, foram registrados diversos episódios de chuvas extremas, típicos da estação de verão e eventos de ZCAS a partir da segunda quinzena.

Dos três anos analisados, o ano de 2007 foi aquele com maior quantidade de focos de queima detectados (202299 focos, que podem ser observados na figura 4.2). Foram identificados 2346 focos no mês de março; 4906 em junho; 63200 em setembro e 5557 em dezembro.

4.1.3. Descrição meteorológica e focos de queima detectados - 2008

Nos três primeiros meses do ano de 2008 destacaram-se as chuvas intensas e acima das médias climatológicas em parte das regiões Norte, Sudeste e Centro-Oeste, favorecidas principalmente pela atuação de episódios de ZCAS. Houve chuva intensa em grande parte do Nordeste devido ao deslocamento dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), além do posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A região Sul apresentou totais abaixo de suas médias climatológicas, exceto no litoral de Santa Catarina. É válido mencionar que março foi considerado um dos meses mais chuvosos dos últimos anos em quase todo o Nordeste.

O segundo trimestre de 2008 registrou valores acima da média climatológica na porção superior das regiões Norte e Nordeste (atuação da ZCIT), na região Sul (incurso de sistemas frontais, cavados em médios e altos níveis e atuação do jato em baixos níveis). No leste do Nordeste, ocorreram eventos de precipitação extrema associados a distúrbios ondulatórios de leste, mas ainda assim os valores estiveram abaixo da média climatológica para o período. As regiões Centro-Oeste e Sudeste tiveram valores acima da média climatológica no mês de abril, mas houve o predomínio de precipitação reduzida nos meses seguintes. Junho teve precipitação reduzida na maior parte do interior do Brasil e os maiores totais de precipitação ocorreram no extremo norte do Brasil e na região Sul.

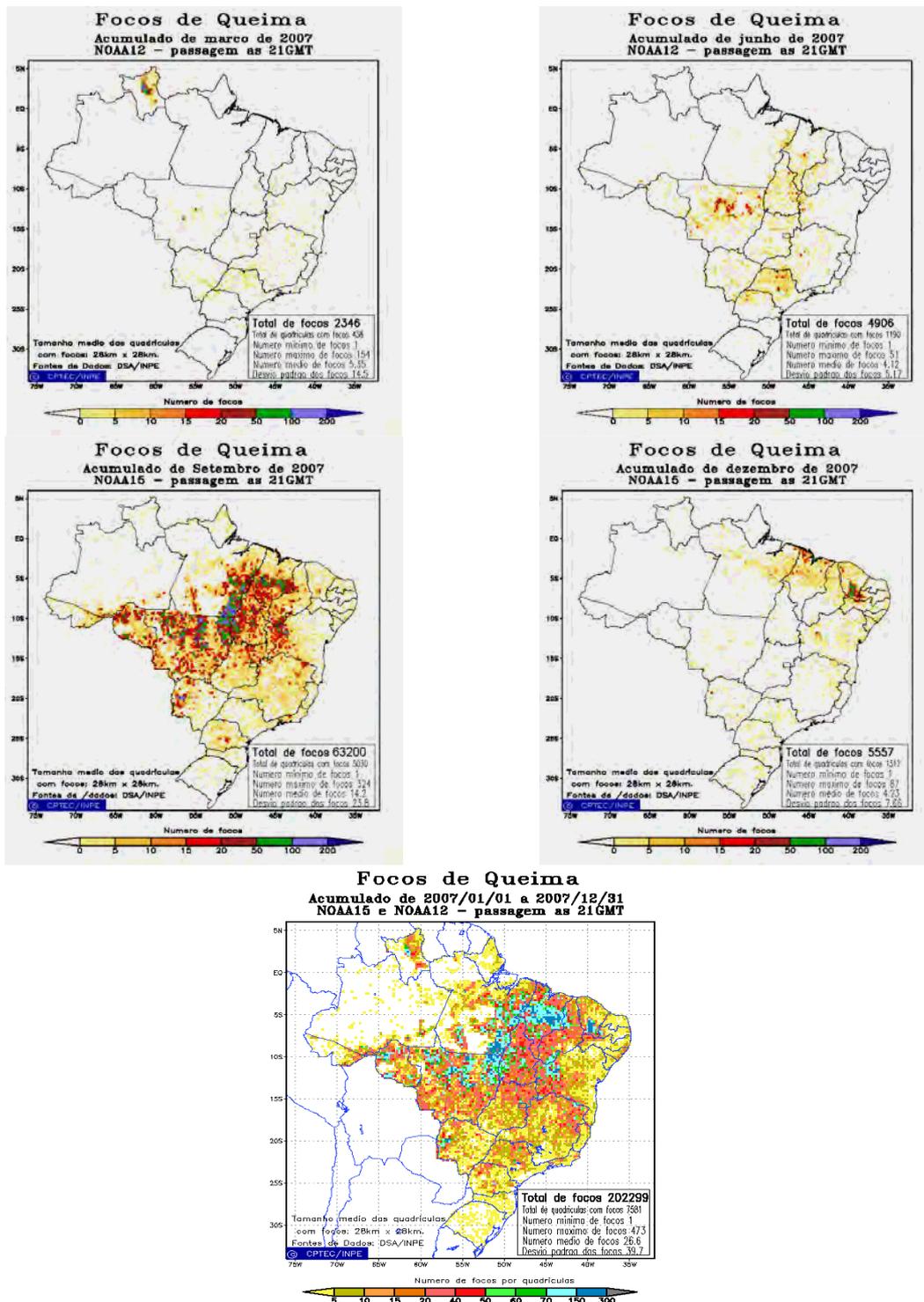


Figura 4.2 – Focos de queimadas identificados no ano de 2007.

Fonte: DSA/INPE.

O trimestre julho - agosto - setembro foi caracterizado por chuvas abaixo da média climatológica no centro do continente. Em grande parte da região Norte, na região Sul e algumas áreas do Nordeste verificaram-se valores acima da média climatológica, devido ao estabelecimento da Alta da Bolívia, a atuação de sistemas frontais e distúrbios de leste, respectivamente. Setembro foi um mês com temperaturas elevadas e ausência de precipitação no Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. No entanto, houve chuva intensa nas regiões Sul, Sudeste e grande parte da região Norte.

O último trimestre do ano de 2008 apresentou chuvas acima da média climatológica em quase toda a região Norte e grande parte das regiões Centro-Oeste e Sudeste, devido à atuação de eventos de ZCAS. Um sistema de alta pressão estacionário, juntamente com perturbações em altos níveis, gerou condições propícias para grandes volumes de precipitação na região Sul, afetando o estado de Santa Catarina. Na maior parte da região Nordeste ocorreram valores negativos de anomalia de precipitação.

Foram identificados 134864 focos de queimada, como mostrado na figura 4.3, sendo 868 focos em março; 2549 em junho; 27873 em setembro e 9218 em dezembro.

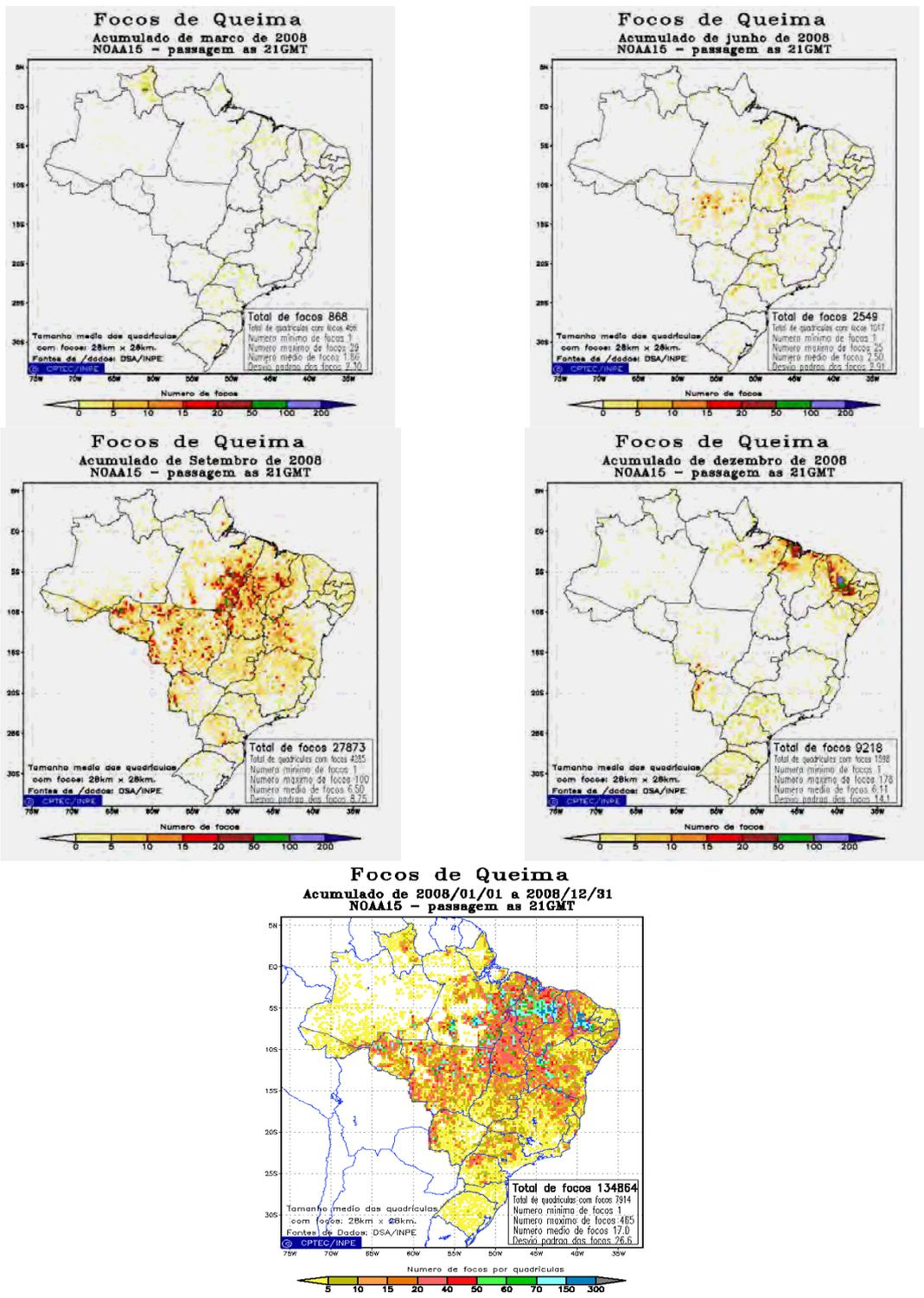


Figura 4.3 – Focos de queimadas identificados no ano de 2008.

Fonte: DSA/INPE.

4.2. Adequação da base de visibilidade horizontal a partir dos dados de aeroportos

Utilizando a metodologia descrita no item 3.3, as bases de visibilidade horizontal média mensais utilizadas pelo modelo BRASIL-SR foram adequadas às condições ambientais observadas no país, entre os anos de 2006 e 2008. A figura 4.4 mostra os valores médios mensais de visibilidade horizontal, interpolados para todo o território brasileiro. Pode-se verificar a variabilidade sazonal da visibilidade horizontal, com os maiores valores registrados no mês de março, final da estação chuvosa na maior parte do território brasileiro. Além da diminuição da ocorrência das queimadas, um dos mecanismos mais importantes na remoção dos aerossóis atmosféricos é a precipitação. Ainda assim, verifica-se um núcleo de menor visibilidade na região sudeste, que pode estar relacionado com as emissões das grandes cidades.

A partir daí, a visibilidade horizontal diminui gradativamente, principalmente na região Sudeste. No mês de junho já se pode observar que o núcleo identificado em março está mais pronunciado, com valores médios de 8,8 km. Valores mais baixos também passam a ser observados na região Sul.

O mês de setembro, como era esperado devido ao fato deste ser o mês onde ocorre a maior incidência de queimadas, é aquele onde são observados os menores valores de visibilidade horizontal. Os núcleos são bem pronunciados nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil, chegando a uma visibilidade de até 7,7 km.

A partir do mês de outubro, a visibilidade horizontal passa a aumentar gradativamente, graças ao início da estação chuvosa na maior parte do território brasileiro. Em dezembro, os menores valores de visibilidade horizontal estão em torno de 9,2 km nas regiões Norte e Sudeste.

Durante todo o ano, os maiores valores de visibilidade horizontal são observados na região Nordeste e na porção leste da região Norte, com valores superiores a 12 km em diversas estações durante todo o ano. Não foram observados sinais da queima da biomassa que ocorre na região Nordeste entre os meses de outubro a janeiro nos dados de visibilidade horizontal dos aeroportos.

Para os experimentos a serem realizados com a visibilidade horizontal no modelo BRASIL-SR, optou-se por gerar campos de visibilidade horizontal para os meses de março, junho, setembro e dezembro dos anos de 2006, 2007 e 2008, permitindo assim verificar se a adequação da média mensal de visibilidade horizontal representaria de maneira mais consistente a carga de aerossóis atmosféricos no mês em questão.

A figura 4.5 apresenta a visibilidade horizontal para os meses a serem simulados, no ano de 2006. Verifica-se um padrão semelhante ao apresentado na figura 4.4, com os maiores valores de visibilidade horizontal observados no mês de março e os menores em setembro. O mês de Março apresenta os maiores valores nas regiões Nordeste e Norte do Brasil, com regiões em torno de 10,5 km; os núcleos com os menores valores de visibilidade estão em torno de 10,1 km, localizados na região Sudeste do Brasil. O mês de Junho tem os maiores valores de visibilidade na região Norte do Brasil, e os menores nas regiões Sul e Sudeste, em especial próximo as grandes capitais brasileiras, com valores da ordem 10,6 km e 9,4 km, respectivamente.

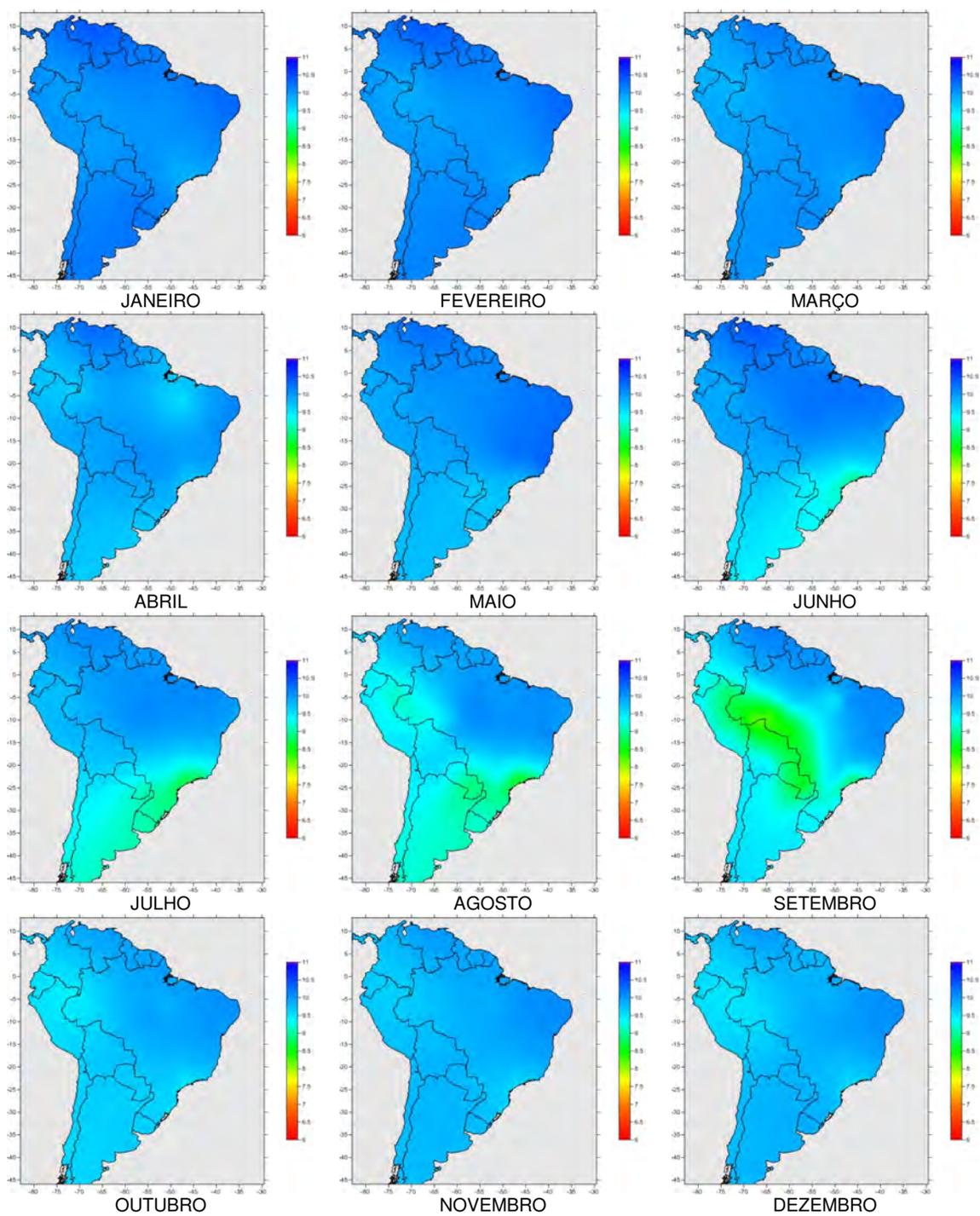


Figura 4.4 – Média mensal de visibilidade horizontal (em km), atualizada a partir dos dados de visibilidade observados em aeroportos nos anos de 2006, 2007 e 2008.

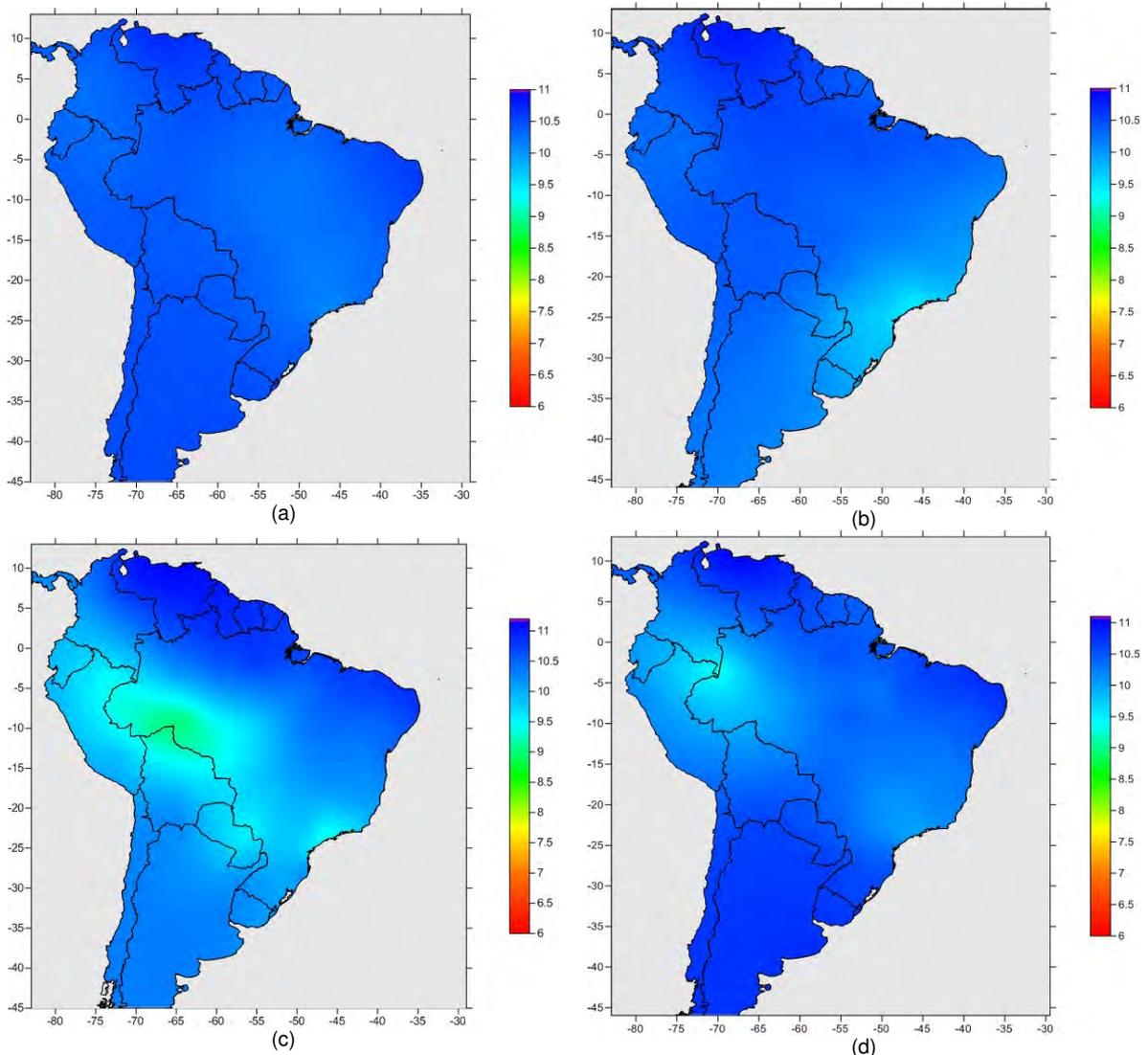


Figura 4.5 – Visibilidade horizontal média mensal (em km) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.

O mês de Setembro registra menores valores de visibilidade horizontal em uma extensa faixa que vai do Sudeste ao Centro-Norte do Brasil, atingindo valores de visibilidade horizontal de até 9,0 km; os maiores valores neste mês são encontrados na região Norte do Brasil, atingindo até 10,6 km. Já dezembro apresenta um núcleo de baixa visibilidade horizontal na região Norte, com valores de visibilidade em torno de 9,4 km. Os maiores valores são verificados nas regiões Sul e Nordeste, com áreas em torno de 10,6 km.

A figura 4.6 apresenta os valores de visibilidade horizontal para os mesmos meses de março, junho, setembro e dezembro para o ano de 2007. Mais uma vez, a variabilidade sazonal da visibilidade horizontal foi observada, mas com valores em geral menores que os verificados no ano de 2006, o que é condizente com o maior número de queimadas detectados neste ano.

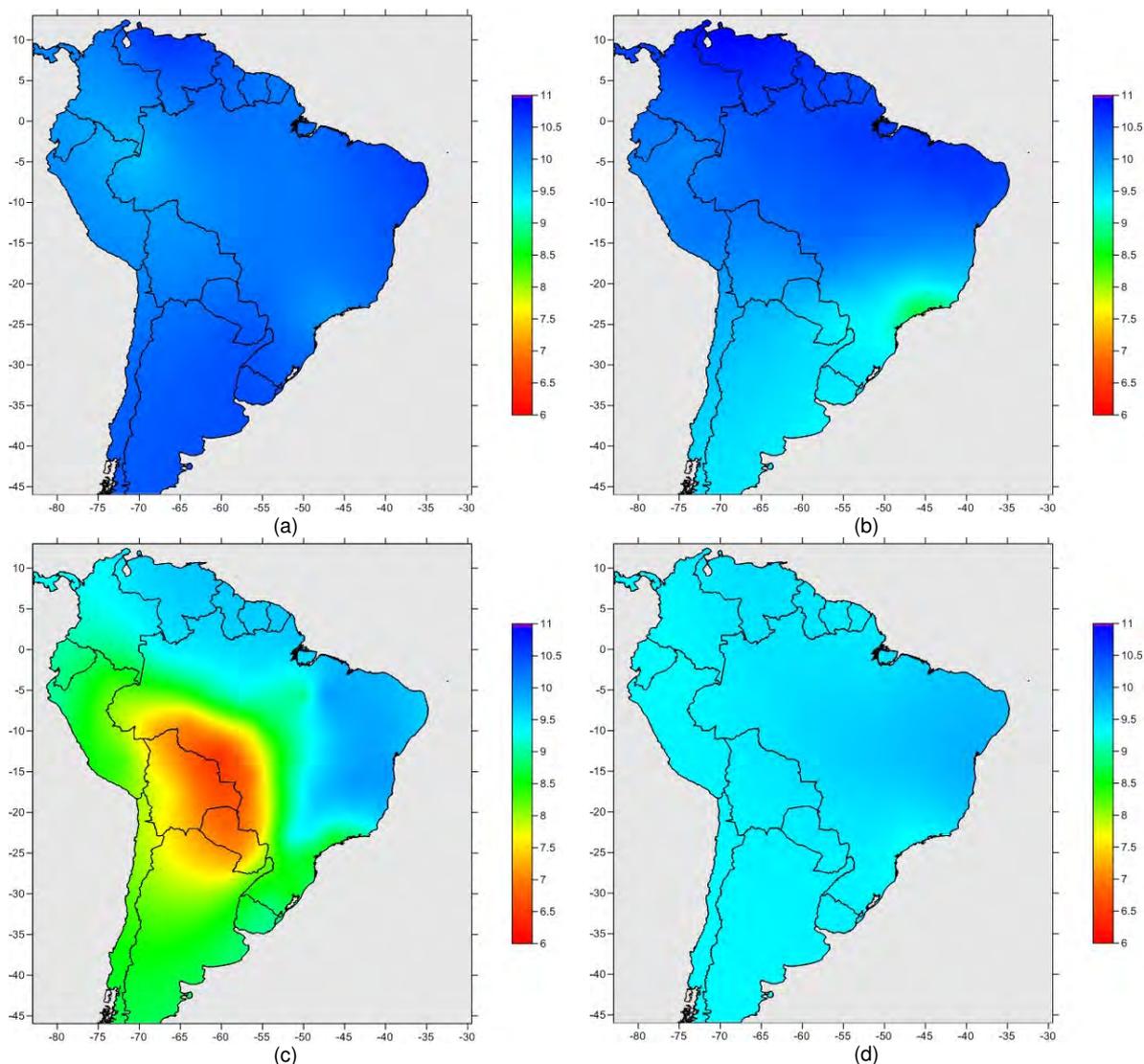


Figura 4.6 – Visibilidade horizontal média mensal (em km) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.

Em 2007, o mês de março apresentou menores valores – em torno de 9,7 km na região Norte do Brasil e os maiores valores foram verificados nas regiões Sul e Nordeste. No mês de junho, os maiores valores foram verificados na

porção Norte do continente, com extremos em torno de 10,6 km no Norte-Nordeste do Brasil; na porção Sul, os mínimos estiveram em torno de 8,7 km. O mês de Setembro é caracterizado por um extenso núcleo no Centro-Norte do Brasil, com valores que chegam até 6,7 km de visibilidade horizontal; os maiores valores de visibilidade foram observados no Nordeste brasileiro, em torno de 10 km. Em dezembro, a visibilidade horizontal alcançou valores em torno de 9,5 km em toda a América do Sul, com uma pequena região em torno de 9,8 km na região Nordeste do Brasil.

Os valores de visibilidade horizontal para o ano de 2008 são apresentados na figura 4.7. Analisando os mapas, verifica-se uma variabilidade bem menos pronunciada que nos anos anteriores, mas com valores médios quase sempre abaixo de 10 km. O mês de março teve máximos de visibilidade em torno de 9,8 km no Nordeste e mínimos em torno de 9,3 km na região Sudeste. Em junho, a visibilidade teve máximos em torno de 9,8 km no Centro do Brasil, e mínimos de 8,5 km na região Sudeste. Em setembro, a redução da visibilidade não foi tão pronunciada quanto nos dois anos anteriores. No entanto, foram observados valores em torno de 8,3 km no Centro-Norte e no Sudeste do Brasil. Os maiores valores de visibilidade em Setembro estão em torno de 9,8 km, no Nordeste brasileiro, e em um pequeno núcleo na região Norte. O mês de Dezembro, por sua vez, apresentou um padrão mais próximo do observado em anos anteriores, com maiores valores no Nordeste do Brasil e os menores na região Sudeste: 9,8 km e 9,1 km, respectivamente.

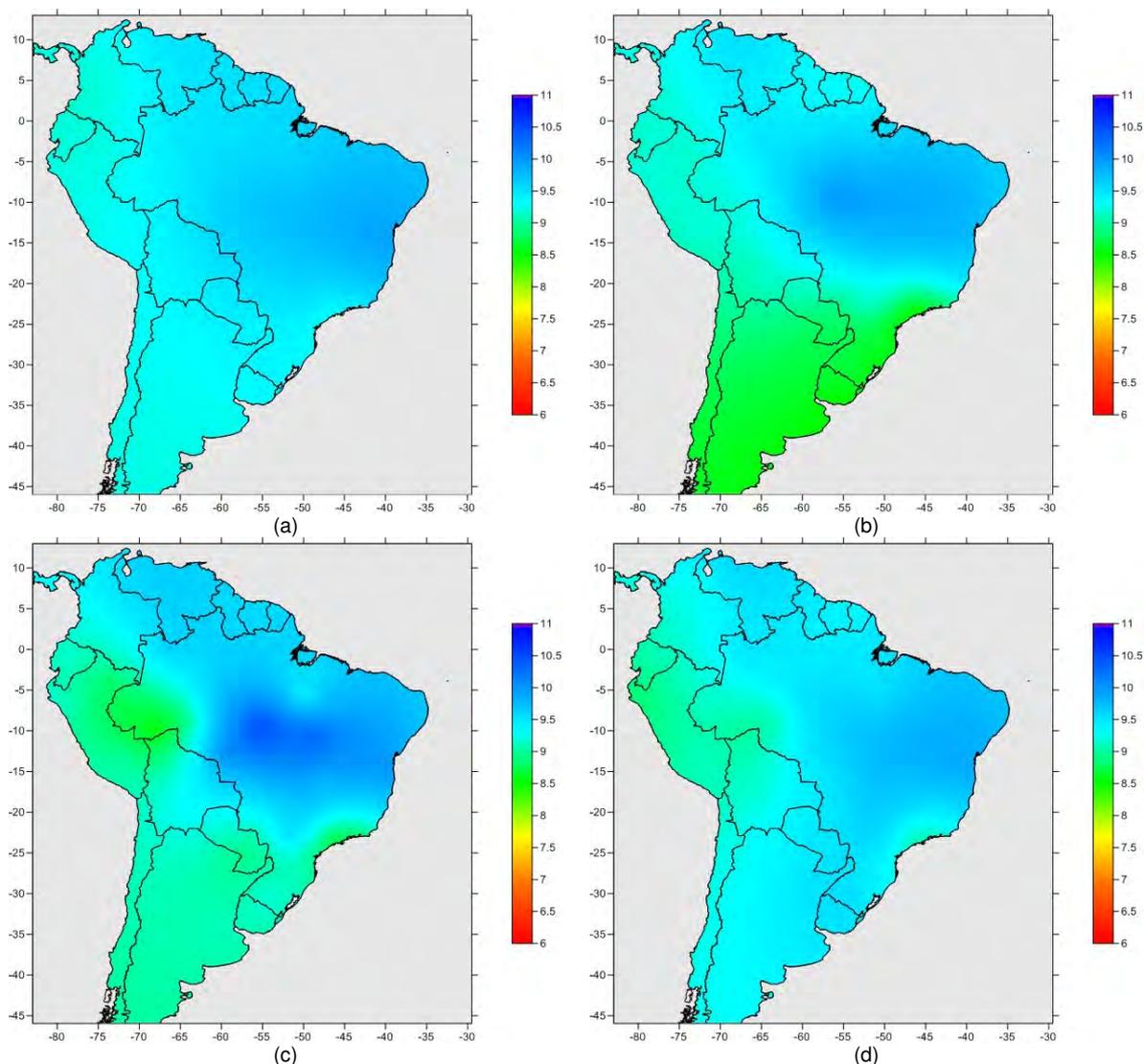


Figura 4.7 – Visibilidade horizontal média mensal (em km) para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.

4.2.1. Mapas de visibilidade horizontal estimada através da espessura óptica dos aerossóis do modelo CATT-BRAMS

A segunda metodologia para geração dos mapas de visibilidade horizontal utilizou dados de espessura óptica dos aerossóis em 550 nm fornecidos pelo modelo CATT-BRAMS, como descrito anteriormente.

A aproximação sugerida por Vermote *et al.* (2002) fornece valores de visibilidade horizontal acima de 50 km e 250 km para valores de espessura óptica dos aerossóis na ordem de 0,16 e 0,1, respectivamente. Em função disso, para garantir a estabilidade da formulação da aproximação e valores de visibilidade horizontal coerentes, os valores de espessura óptica inferiores a 0,1 foram substituídos por este valor.

A figura 4.8 apresenta os mapas de visibilidade horizontal para os meses de março, junho, setembro e dezembro do ano de 2006. Conforme esperado, os menores valores de visibilidade horizontal estiveram geograficamente distribuídos em acordo com as queimadas observadas pela DSA/INPE no território brasileiro neste período (figura 4.1), com pontos de menor visibilidade na região Centro-Oeste e Norte em março (figura 4.8 a); em parte das regiões Norte, Centro-Oeste e Sul em junho (figura 4.8 b); nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste em setembro (figura 4.8 c); e nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste no mês de dezembro (figura 4.8 d). Em todos estes meses, valores de visibilidade horizontal de até 3 km foram estimadas.

Os mapas de visibilidade horizontal estimada através das simulações do CATT-BRAMS para os quatro meses do ano de 2007 são apresentados na figura 4.9. Também apresentando concordância com os focos de queima de biomassa apresentados na figura 4.2, foram observados menores valores de visibilidade horizontal no mês de março nas regiões Norte e Centro-Oeste (figura 4.9 a); uma faixa compreendendo parte das regiões Norte, Centro-Oeste e Sul no mês de junho (figura 4.9 b); um grande núcleo compreendendo todo o território brasileiro em setembro, exceto o norte do país e a porção norte da região Nordeste (figura 4.9 c); e núcleos nos estados do Pará, Maranhão e Tocantins em dezembro (figura 4.9 d).

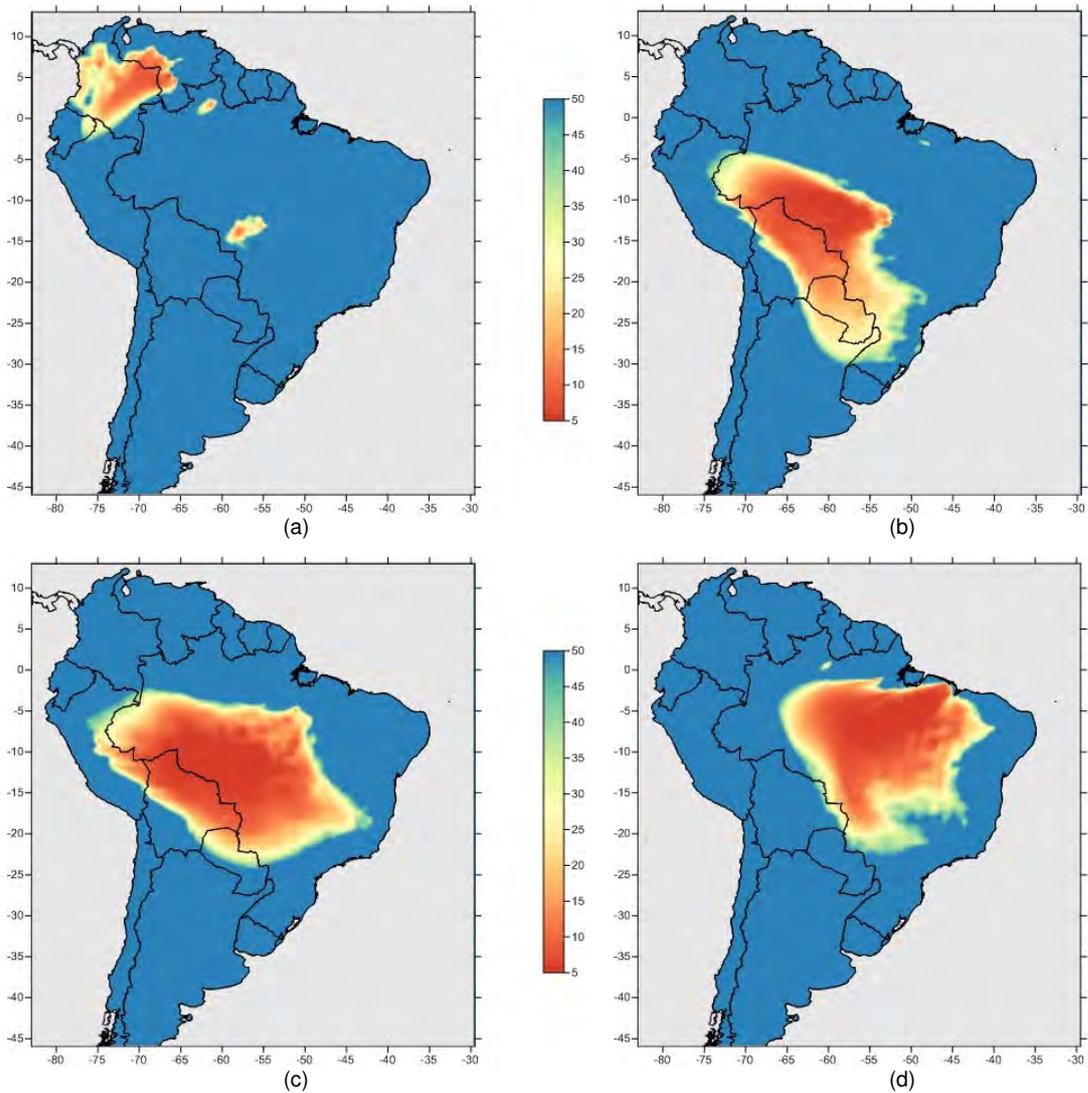


Figura 4.8 – Visibilidade horizontal média estimada (em km) a partir da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm do modelo CATT-BRAMS para o ano de 2006, nos meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).

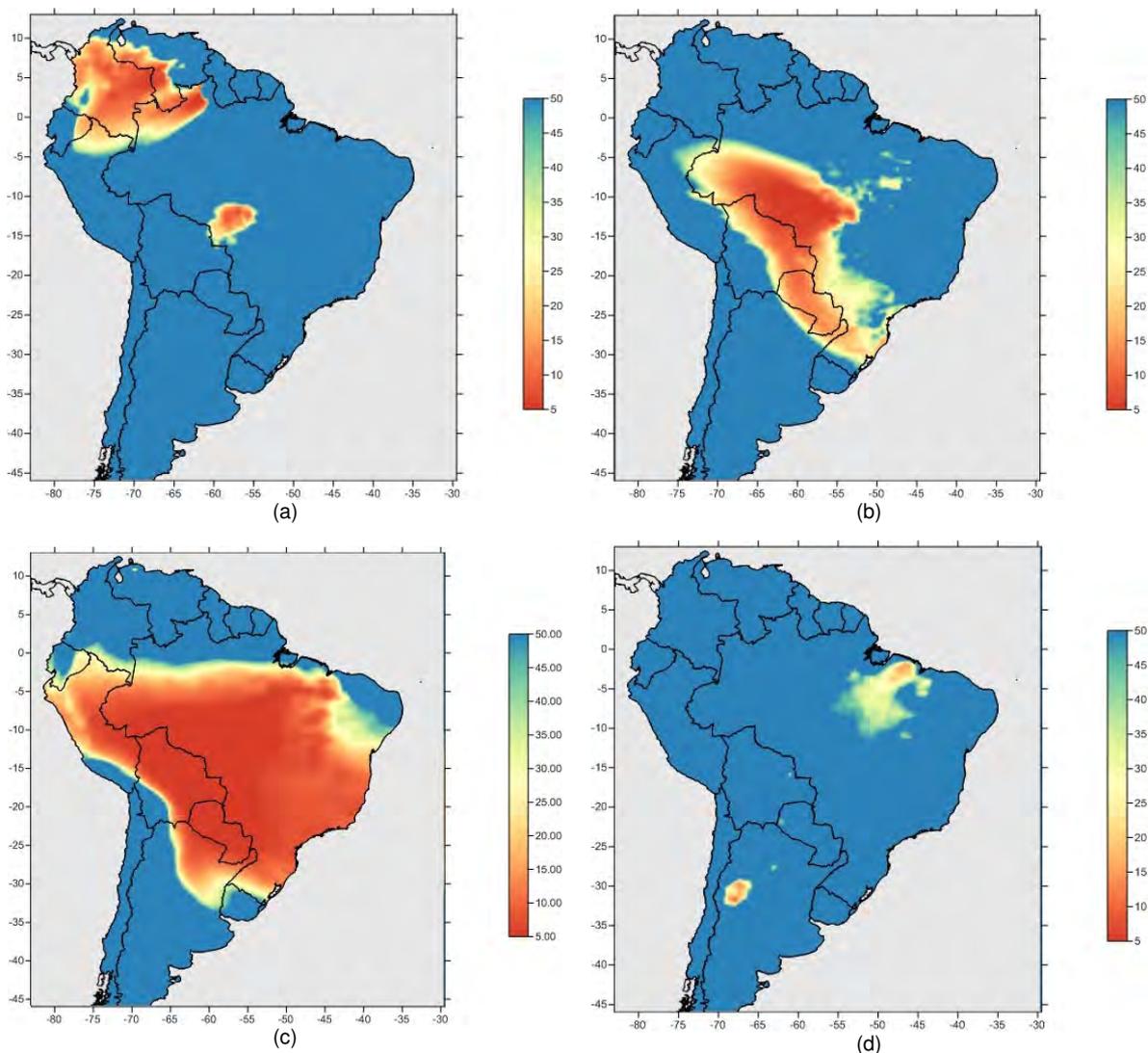


Figura 4.9 – Visibilidade horizontal média estimada (em km) a partir da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm do modelo CATT-BRAMS para o ano de 2007, nos meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).

Já a figura 4.10 apresenta os mapas de visibilidade horizontal para o ano de 2008. Os valores obtidos, assim como nos anos anteriores, apresentam concordância com os focos de queima de biomassa identificados pela DSA/INPE (figura 4.3). O mapa de março não apresenta regiões com menor visibilidade definidas (figura 4.10 a); o mês de junho também apresenta elevados valores de visibilidade, com alguns núcleos com menores valores no estado do Mato Grosso (figura 4.10 b), Já setembro (figura 4.10 c), mês com

elevado total de focos de queima detectados, um expressivo núcleo na região central do continente é verificado; e dezembro (figura 4.10 d), com menores valores no extremo norte da região Nordeste, mas também atingindo os estados do Pará e Tocantins.

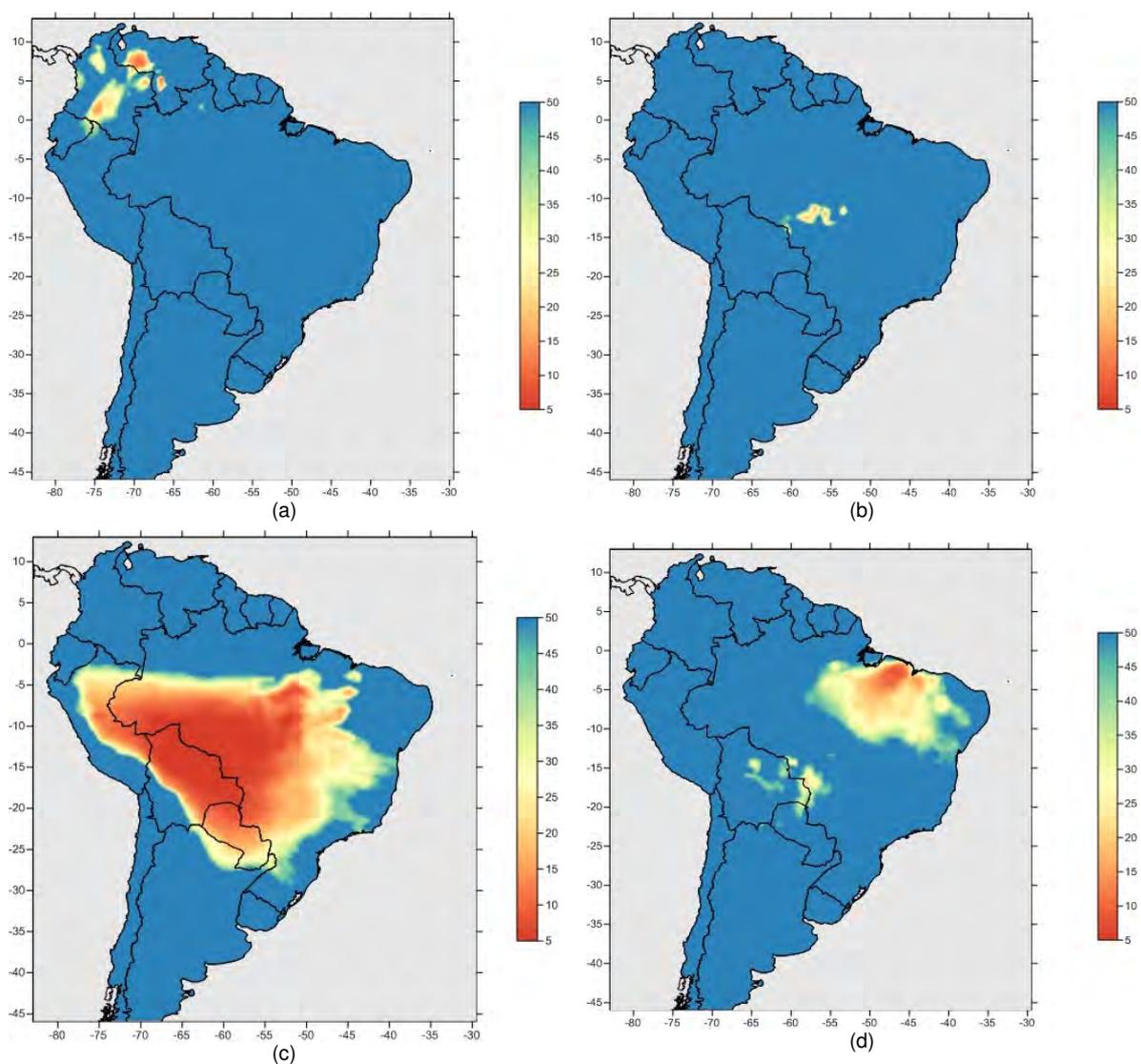


Figura 4.10 – Visibilidade horizontal média estimada (em km) a partir da espessura óptica dos aerossóis em 550 nm do modelo CATT-BRAMS para o ano de 2008, nos meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d).

Como mencionado anteriormente, há concordância entre as regiões fonte de aerossol de queima de biomassa (detectadas através dos focos de queimada)

e os valores de visibilidade horizontal. É importante mencionar também que a obtenção dos valores de visibilidade horizontal através de modelos como o CATT-BRAMS, ou mesmo através de observações por satélite, como os dados do sensor MODIS, agregam ao dado a informação do transporte atmosférico destas partículas. Outro ponto a ser mencionado é que estes valores de visibilidade podem não ser efetivamente observados na superfície, já que são obtidos pela espessura óptica do aerossol integrada em toda a coluna. Em situações onde os aerossóis estiverem acima da camada limite planetária, por exemplo, não haveria a concordância dos valores de visibilidade horizontal em superfície, mas a estimativa seria adequada para a quantificação das partículas existentes.

4.3. Simulações de referência - Modelo BRASIL-SR utilizando a base climatológica original de visibilidade horizontal

Conforme mostrado nos capítulos anteriores, o modelo BRASIL-SR faz uso de uma base climatológica de visibilidade horizontal, que varia mensalmente e possui valores distribuídos em faixas latitudinais de 5° de espessura. Esta caracterização não é condizente com as condições encontradas no território brasileiro. Os resultados das simulações utilizando esta base de visibilidade, juntamente com os dados medidos em estações de superfície foram tomados como referência para as comparações com os demais experimentos. As análises foram focadas apenas no território brasileiro.

4.3.1. Simulações para o ano de 2006

A figura 4.11 mostra os mapas de irradiação global média diária (em kWh/m²) para os meses de março, junho, setembro e dezembro para o ano de 2006. O mês de março (figura 4.11 a) apresentou os maiores valores nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste do Brasil, em torno de 5,8 kWh/m², 6,0 kWh/m² e 5,6 kWh/m², respectivamente. Os menores valores foram observados na faixa leste da região Sul e na porção central da região Norte, com radiação diária de até 4,4 kWh/m². O mês de junho (figura 4.11 b) apresentou uma diminuição considerável da irradiação global no território brasileiro, sendo os

menores valores verificados na região Sul, estando abaixo de $3,0 \text{ kWh/m}^2$. Os maiores valores foram observados na porção leste da região Norte e oeste da região Nordeste, em torno de $5,3 \text{ kWh/m}^2$. Os maiores valores anuais foram observados no mês de dezembro (figura 4.11 d), quando na região Sul do Brasil foram verificados valores de até $7,4 \text{ kWh/m}^2$. Também foram observados valores em torno de $6,7 \text{ kWh/m}^2$ na região Nordeste. Os menores valores estavam em torno de $4,3 \text{ kWh/m}^2$, em pequenas regiões do Sudeste e Norte.

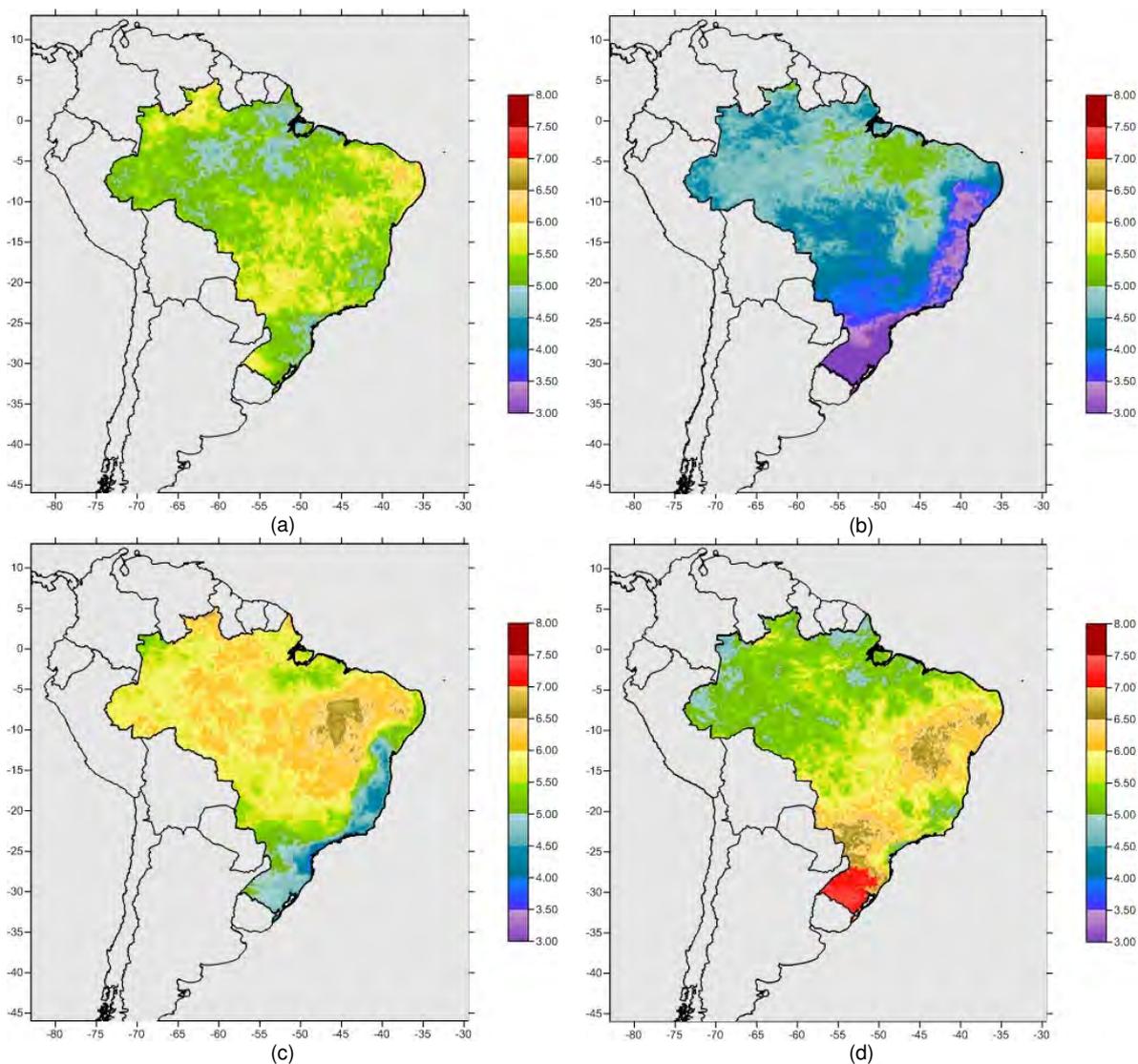


Figura 4.11 – Mapas de irradiação global média diária (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.

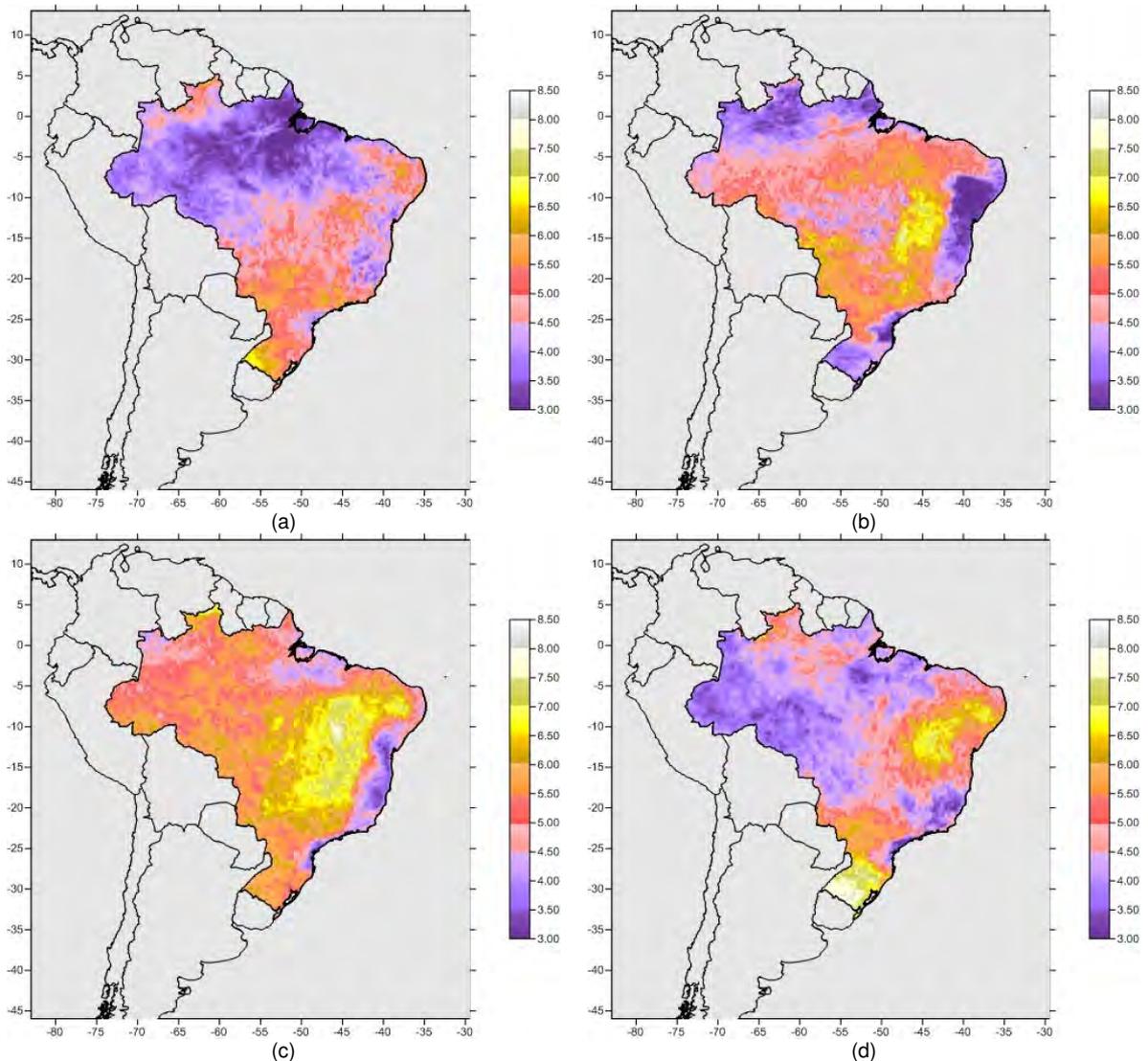


Figura 4.12 – Mapas de irradiação direta (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.

A radiação volta a aumentar em setembro (figura 4.11 c), com os maiores valores na porção central da região Nordeste, em torno de $6,8 \text{ kWh/m}^2$. Os menores valores foram verificados, de um modo geral, na região litorânea das regiões Sul, Sudeste e Nordeste, até os limites do estado da Bahia, chegando a valores da ordem de $4,3 \text{ kWh/m}^2$.

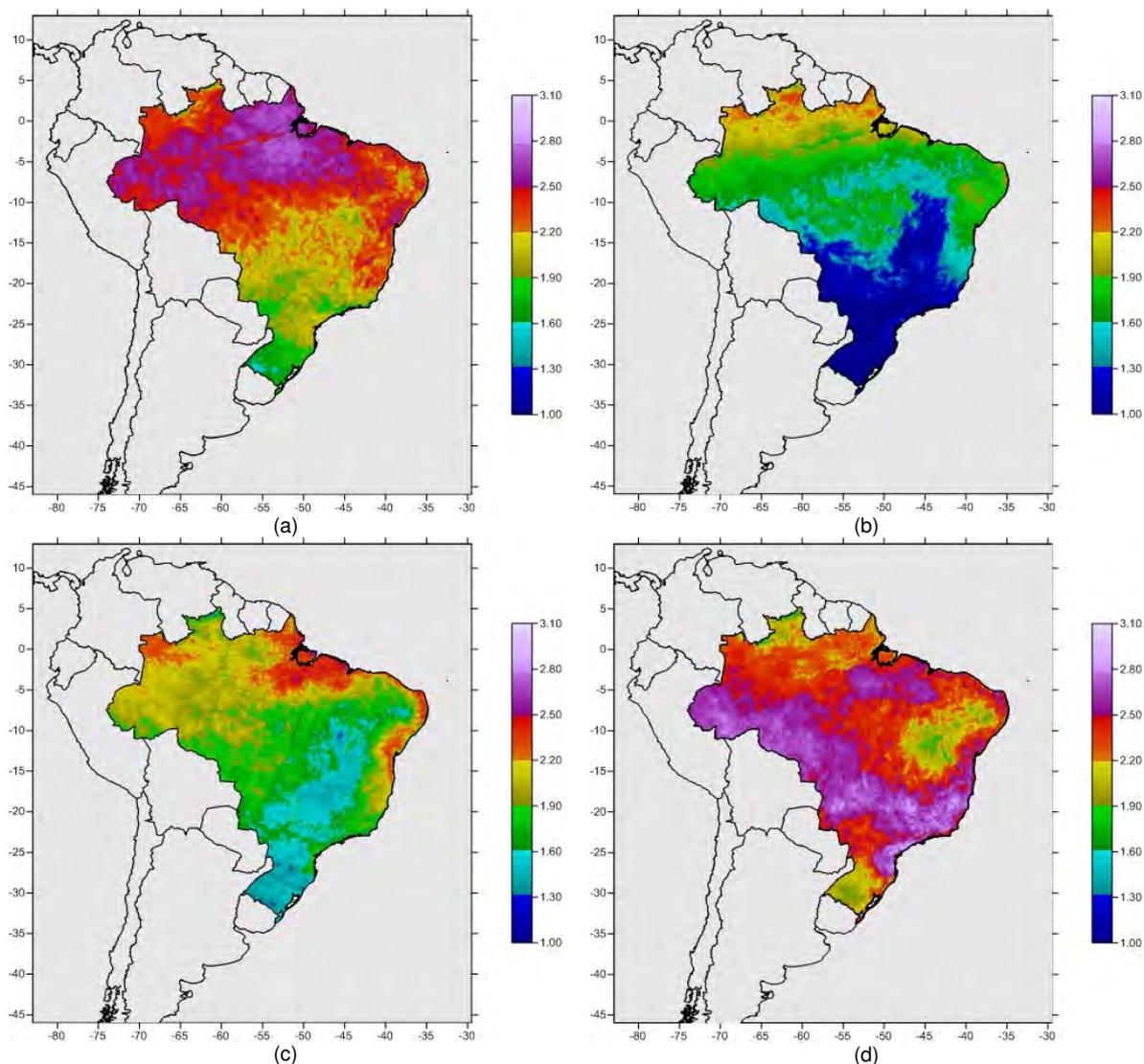


Figura 4.13 – Mapas de irradiação difusa (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2006.

A figura 4.12 mostra os mapas de irradiação direta média diária (em kWh/m^2) para os meses de março, junho, setembro e dezembro de 2006. Verifica-se que março (figura 4.12 a) apresentou os maiores valores de irradiação direta nas regiões Centro-Oeste, Nordeste, Sudeste e porção oeste da região Sul, em torno de $6,2 \text{ kWh/m}^2$, $5,9 \text{ kWh/m}^2$ e $6,1 \text{ kWh/m}^2$ e $6,6 \text{ kWh/m}^2$, respectivamente. Os menores valores estavam na faixa leste da região Sul e na porção central da região Norte, com radiação diária de até $3,1 \text{ kWh/m}^2$.

A irradiação direta apresentou um aumento no centro do território brasileiro no mês de junho de 2006 (figura 4.12 b), estando os maiores valores entre as regiões Nordeste e Sudeste, em torno de 6,8 kWh/m². Os menores valores foram verificados no extremo norte do país e na porção leste do Nordeste e do estado do Paraná, abaixo dos 3,0 kWh/m².

A irradiação direta apresentou valores acima de 5,0 kWh/m² em quase todo o país em setembro (figura 4.12 c), com valores que chegam a 7,8 kWh/m² na região Nordeste. Os menores valores foram verificados na costa leste dos estados da Bahia e Paraná, em torno de 3,3 kWh/m².

O mês de dezembro (figura 4.12 d) foi caracterizado pela diminuição destes valores no território brasileiro, exceto nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, onde foram verificados valores de até 8,1 kWh/m².

A figura 4.13 mostra os mapas de irradiação difusa média diária (em kWh/m²), para as mesmas simulações do ano de 2006. Os maiores valores no mês de março (figura 4.13 a) foram nas regiões Norte e Nordeste, chegando a até 2,9 kWh/m². Já os menores foram verificados na região Sul do país, com valores de até 1,5 kWh/m² no Rio Grande do Sul.

Para o mês de junho (figura 4.13 b) verificou-se uma diminuição na irradiação difusa, em relação à modelada no mês de março, estando os máximos valores no extremo norte do país, em torno de 2,3 kWh/m². Os menores valores foram verificados nas regiões Sudeste e Sul, pouco abaixo de 1,0 kWh/m².

Um aumento na irradiação difusa foi observado em setembro (figura 4.13 c) em relação a junho, sendo que os maiores valores foram observados no litoral do Nordeste e em grande parte da região Norte do país, chegando a até 2,5 kWh/m². Os menores valores foram observados na região Sul, no oeste do Sudeste e Nordeste, atingindo até 1,3 kWh/m².

O mês de dezembro (figura 4.13 d), dentre os quatro meses simulados, é aquele que apresentou maiores valores de irradiação difusa média. Foi verificada uma faixa de valores entre 2,6 kWh/m² e 3,0 kWh/m², que se estende do norte do país ao extremo leste da região sudeste. Os menores valores são observados nas regiões Sul e centro da região Nordeste, atingindo até 1,8 kWh/m².

4.3.2. Simulações para o ano de 2007

A figura 4.14 apresenta a irradiação global média diária (kWh/m²) para os meses simulados no ano de 2007. Observou-se uma variabilidade anual similar a verificada no ano de 2006 (figura 4.11), com pequenas variações nos valores obtidos.

O mês de março (figura 4.14 a) apresentou os maiores valores na porção leste do Centro-Oeste, sul do Nordeste e norte da região Sul, atingindo até 6,2 kWh/m². Os menores valores estiveram na faixa leste da região Sul e extremo norte do país, com radiação diária de até 4,2 kWh/m². O mês de junho (figura 4.14 b) apresentou os maiores valores no centro da região Norte e oeste da região Nordeste, em torno de 5,4 kWh/m². Os menores valores foram verificados na região Sul, estando abaixo de 3,0 kWh/m².

Em setembro (figura 4.14 c) ocorreram valores de irradiação global acima de 5,2 kWh/m² em todo o território brasileiro, exceto na porção leste e no sul da região Sul, onde valores de até 3,9 kWh/m² foram verificados.

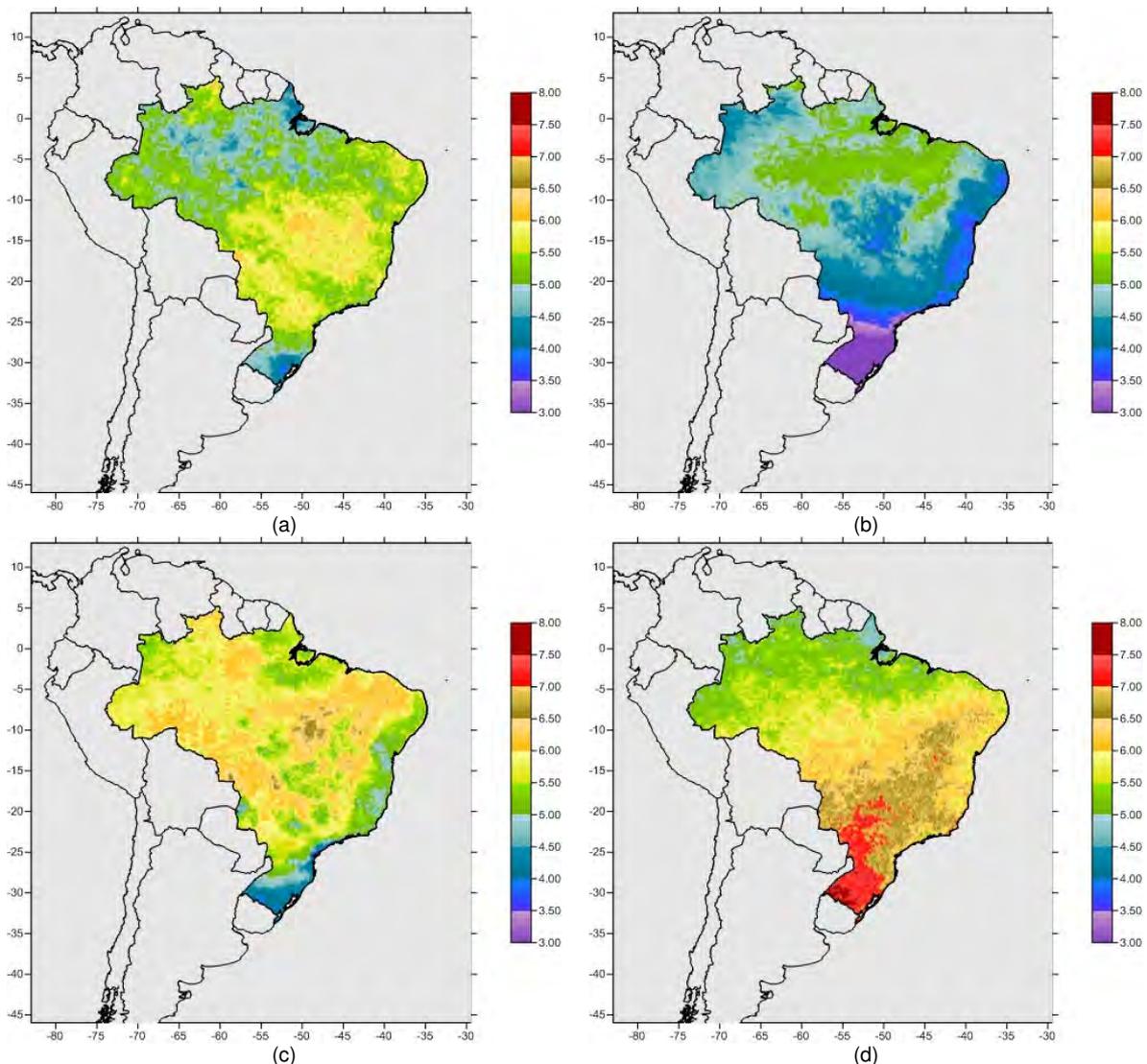


Figura 4.14 – Mapas de irradiação global (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.

Já em dezembro (figura 4.14 d), verificou-se uma situação oposta, onde os menores valores foram verificados no norte do país (até $4,9 \text{ kWh/m}^2$) e os maiores foram observados na região Sul, com valores de até $7,6 \text{ kWh/m}^2$.

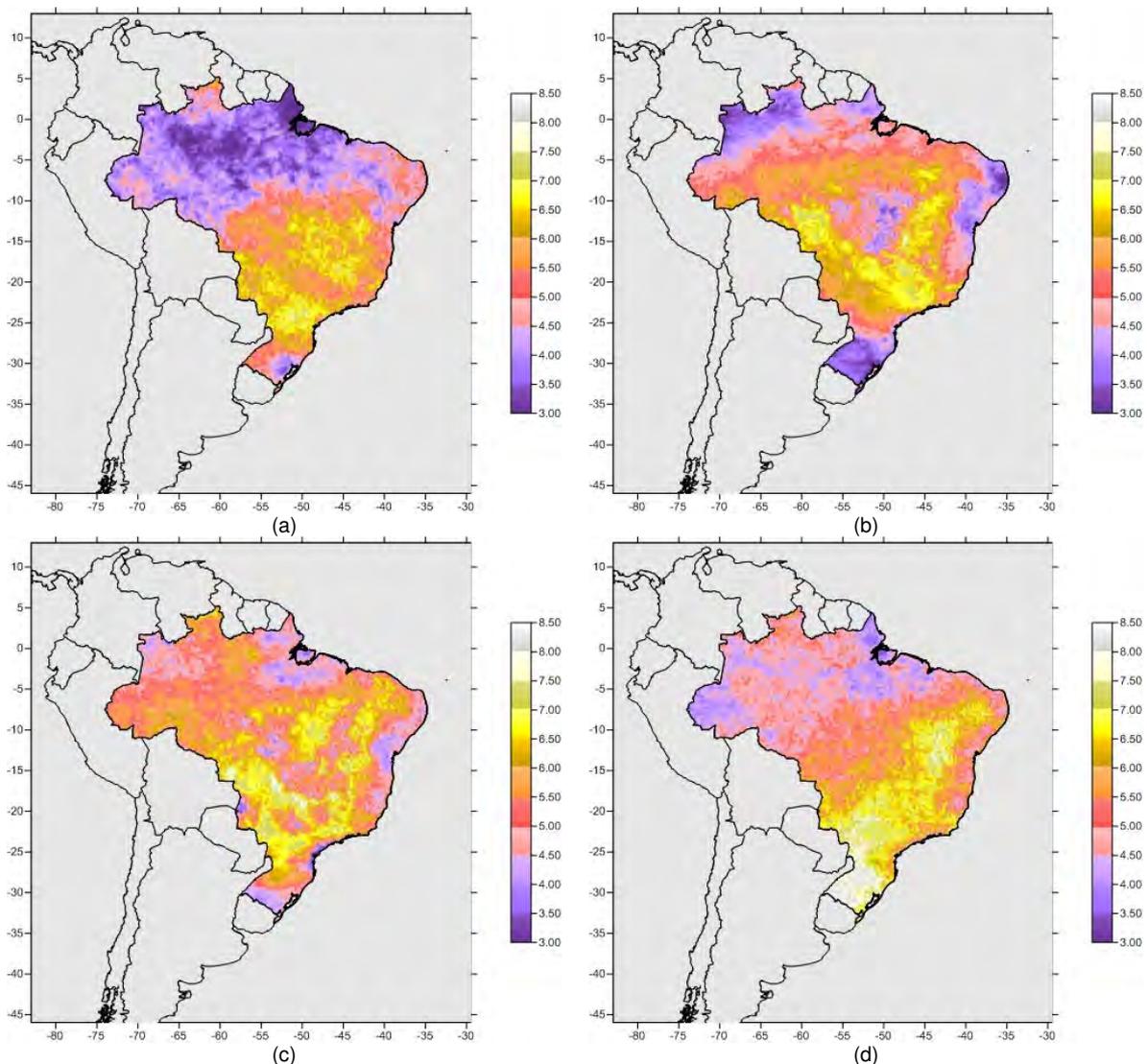


Figura 4.15 – Mapas de irradiação direta (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.

A irradiação direta média diária nos meses simulados para o ano de 2007 é apresentada na figura 4.15. O mês de março (figura 4.15 a) apresentou os maiores valores de irradiação direta na região central do Brasil, compreendendo grande parte das regiões Centro-Oeste, Nordeste, Sudeste e Sul, com valores máximos em torno de $7,1 \text{ kWh/m}^2$. Os menores valores foram observados na região Norte e extremo sul do país, em torno de $3,1 \text{ kWh/m}^2$.

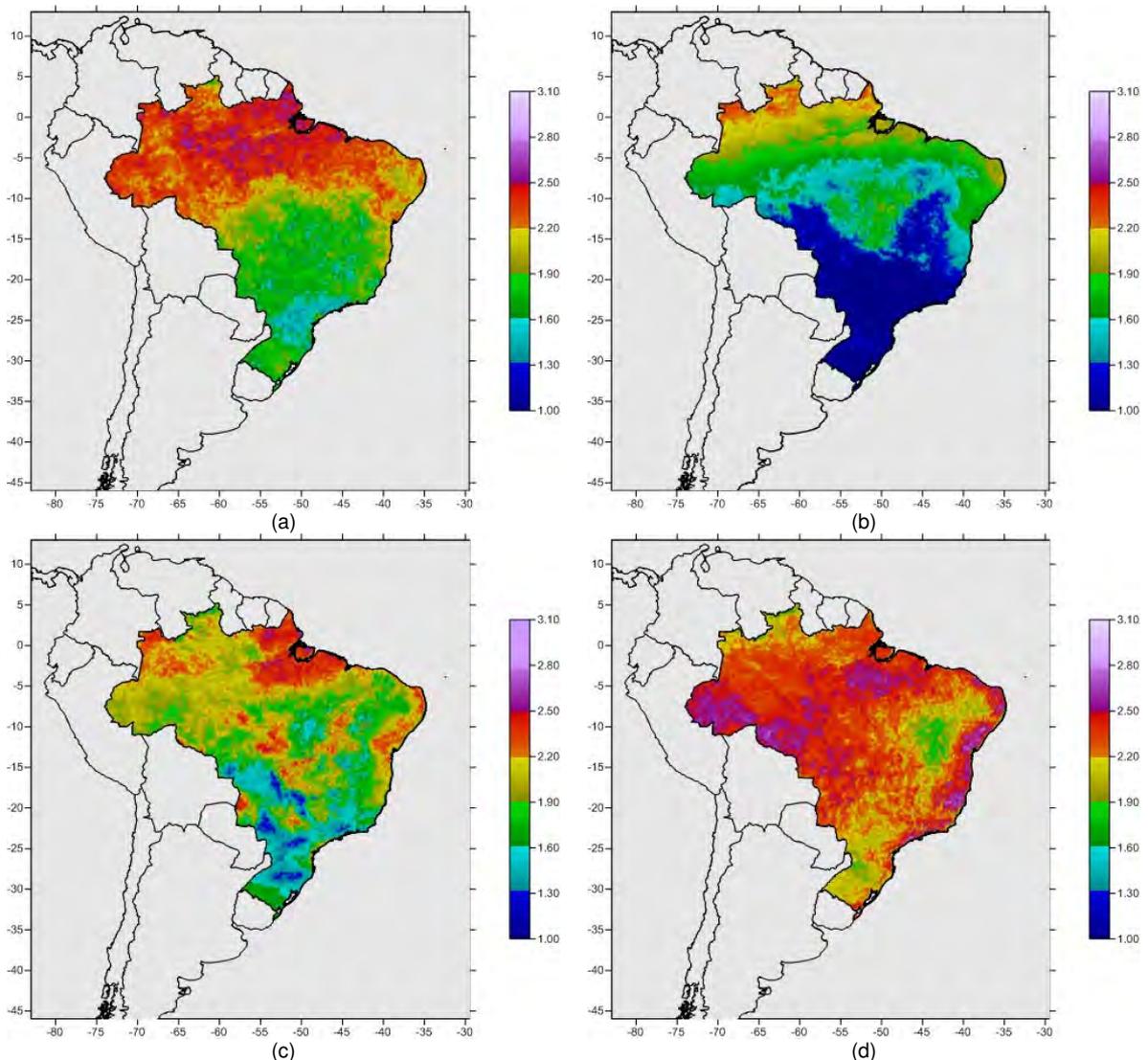


Figura 4.16 – Mapas de irradiação difusa (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2007.

O mês de junho (figura 4.15 b) apresentou os maiores valores de irradiação direta média diária no oeste das regiões Centro-Oeste e Nordeste e no centro da região Sudeste, com valores máximos em torno de $7,6 \text{ kWh/m}^2$. Os menores valores foram verificados na porção leste da região Nordeste, centro da região Centro Oeste, e nos extremos do país, em torno de $3,1 \text{ kWh/m}^2$.

O mês de setembro (figura 4.15 c) apresentou valores acima de $5,0 \text{ kWh/m}^2$ em quase todo o território brasileiro, estando os maiores valores nas regiões

Centro-Oeste e Sudeste, chegando a até 8,1 kWh/m². Os menores valores estão no litoral da região Sul, atingindo valores de até 3,4 kWh/m².

O mês de dezembro (figura 4.15 d) também apresentou valores de radiação solar direta acima de 5,0 kWh/m² em grande parte do território brasileiro, mas foram observados valores acima de 8,2 kWh/m² na região Sul e no centro da região Nordeste. Os menores valores foram observados no extremo norte do país, em torno de 3,8 kWh/m².

A irradiação difusa média diária para as simulações do ano de 2007 são apresentadas na figura 4.16. Os maiores valores verificados no mês de março (figura 4.16 a) estão na região norte do país, chegando a até 2,6 kWh/m². A irradiação difusa seguiu diminuindo no sentido sul do país, enquanto que os menores valores foram observados entre as regiões Sul e Sudeste, entre os estados do Paraná e São Paulo, com valores de até 1,3 kWh/m².

Houve uma diminuição considerável na irradiação difusa média diária nas simulações realizadas para o mês de junho de 2007 (figura 4.16 b) em relação ao março do mesmo ano. Os maiores valores observados estão em torno de 2,3 kWh/m² no extremo norte do Brasil, enquanto que valores abaixo de 1,3 kWh/m² foram observados nas regiões Centro-Oeste, Nordeste, Sudeste e Sul. Uma região no centro do país apresentou valores em torno de 1,8 kWh/m². Os valores de irradiação difusa voltaram a aumentar no território brasileiro no mês de setembro (figura 4.16 c), sendo os maiores valores verificados no leste das regiões Norte e Nordeste e em algumas áreas na região Centro-Oeste, com valores em torno de 2,4 kWh/m². Os menores valores foram observados nas regiões Sul e Sudeste, em torno de 1,2 kWh/m². As simulações de dezembro (figura 4.16 d) apresentaram os maiores valores de irradiação difusa média diária no ano de 2007. Valores acima de 2,3 kWh/m² foram verificados nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, com picos de até 2,7 kWh/m². Os menores valores observados estão em torno de 1,7 kWh/m², no centro-oeste nordestino e na região Sul.

4.3.3. Simulações para o ano de 2008

A figura 4.17 apresenta os mapas de irradiação global média diária para os meses de março, junho, setembro e dezembro do ano de 2008. O mês de março (figura 4.17 a) apresentou os maiores valores em uma faixa que se estende do Nordeste ao Centro-Oeste brasileiro, chegando até o norte da região Sul, com maiores valores em torno de $6,4 \text{ kWh/m}^2$. Os menores valores foram observados na região Norte e leste do Paraná, em torno de $4,5 \text{ kWh/m}^2$.

O mês de junho apresentou uma diminuição da irradiação global disponível, em relação ao mês de março, como pode ser observado na figura 4.17 b. Os maiores valores foram verificados nas porções leste da região Norte e oeste da região Nordeste, atingindo $5,3 \text{ kWh/m}^2$. Os menores valores atingem $3,0 \text{ kWh/m}^2$, a partir do litoral do estado baiano, estendendo-se até a região Sul. Observou-se em setembro (figura 4.17 c), em relação ao mês de junho, um aumento considerável na irradiação global média diária em todo o país, com valores máximos no oeste do Nordeste brasileiro. Os menores valores foram observados na faixa leste do Brasil, estendendo-se do litoral da região Sul até o estado de Sergipe. Os menores valores estiveram em torno de $3,4 \text{ kWh/m}^2$.

Por fim, o mês de dezembro (figura 4.17 d) também foi, nas simulações para o ano de 2008, o mês em que os maiores valores de irradiação global foram verificados. Os maiores valores foram observados no estado do Rio Grande do Sul, atingindo até $7,6 \text{ kWh/m}^2$. Os menores valores foram verificados em alguns pontos das regiões Norte e Sudeste do país, em até $4,7 \text{ kWh/m}^2$.

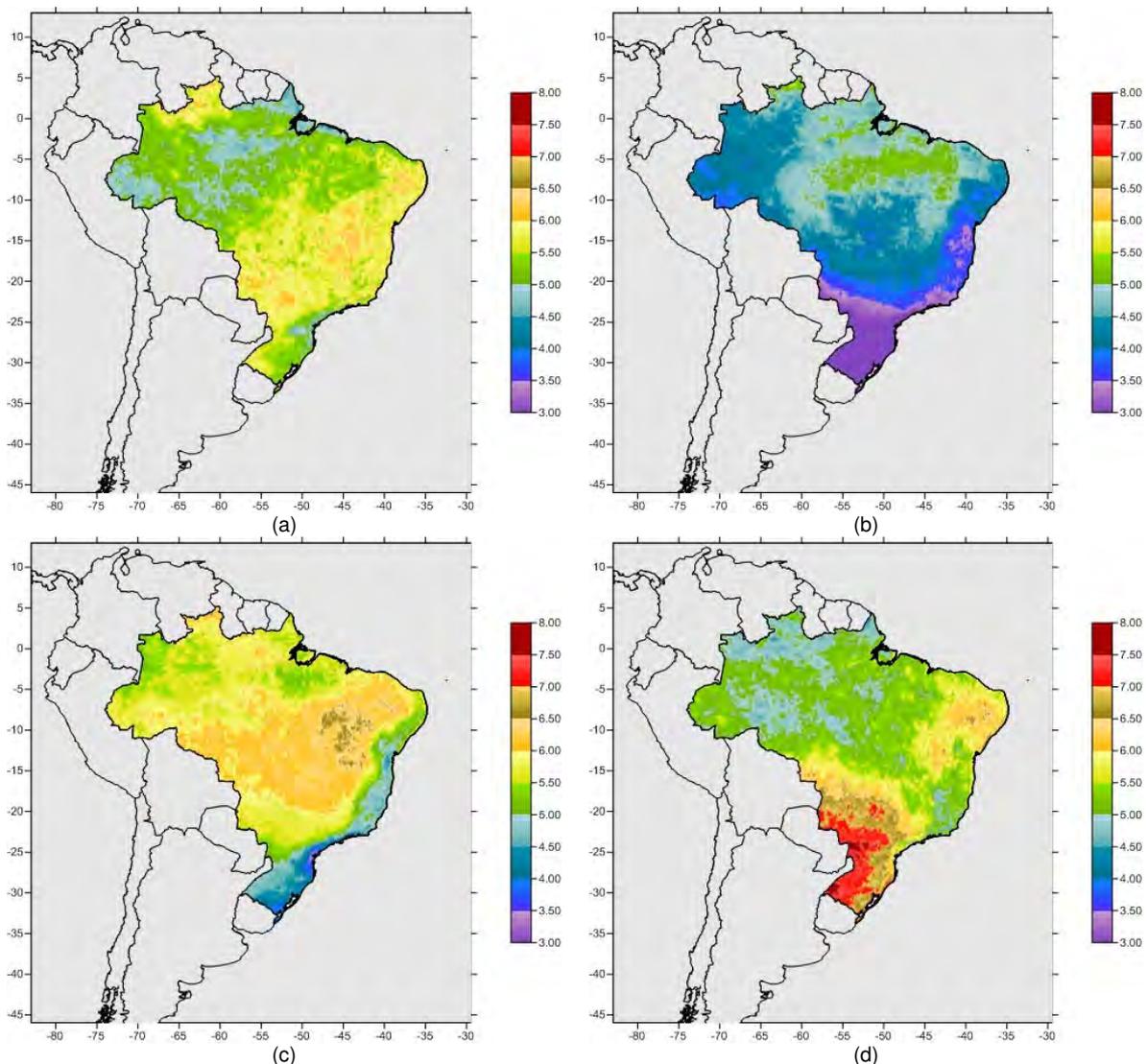


Figura 4.17 – Mapas de irradiação global (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.

Os mapas de irradiação direta média diária para o ano de 2008 são apresentados na figura 4.18. Condizente com a figura 4.17 a, o mês de março (figura 4.18 a) apresentou a mesma faixa nordeste-sudoeste, com os maiores valores observados atingindo até $7,6 \text{ kWh/m}^2$. Os menores valores foram verificados na região Norte, abaixo de $3,0 \text{ kWh/m}^2$. Junho (figura 4.18 b) apresenta maiores valores nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste (até $6,6 \text{ kWh/m}^2$). Menores valores, em torno de $3,1 \text{ kWh/m}^2$, foram

observados no oeste da região Norte e no Sul do país, além de uma faixa na porção leste do Nordeste.

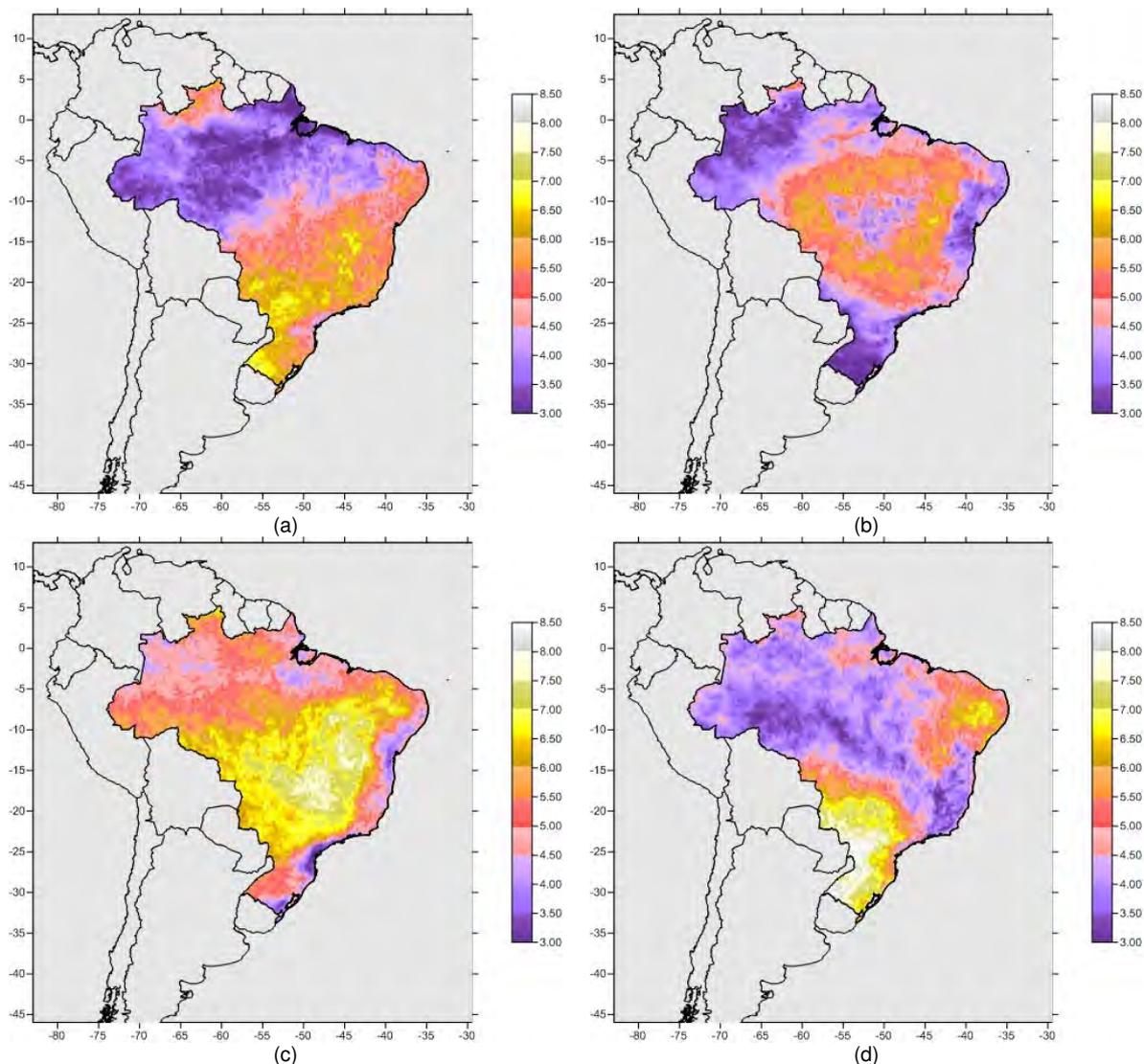


Figura 4.18 – Mapas de irradiação direta (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.

Em setembro observa-se um aumento na irradiação direta disponível em todas as regiões do país, com maiores valores (até $7,8 \text{ kWh/m}^2$) nas regiões Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. Menores valores são verificados no leste do Paraná, em torno de $3,0 \text{ kWh/m}^2$.

Em dezembro, destaca-se uma faixa com menores valores de irradiação direta, estendendo-se da região Norte até o Sudeste do país. A região Sul, o sul do Centro-Oeste e grande parte do Nordeste apresentaram os maiores valores, atingindo até $8,1 \text{ kWh/m}^2$.

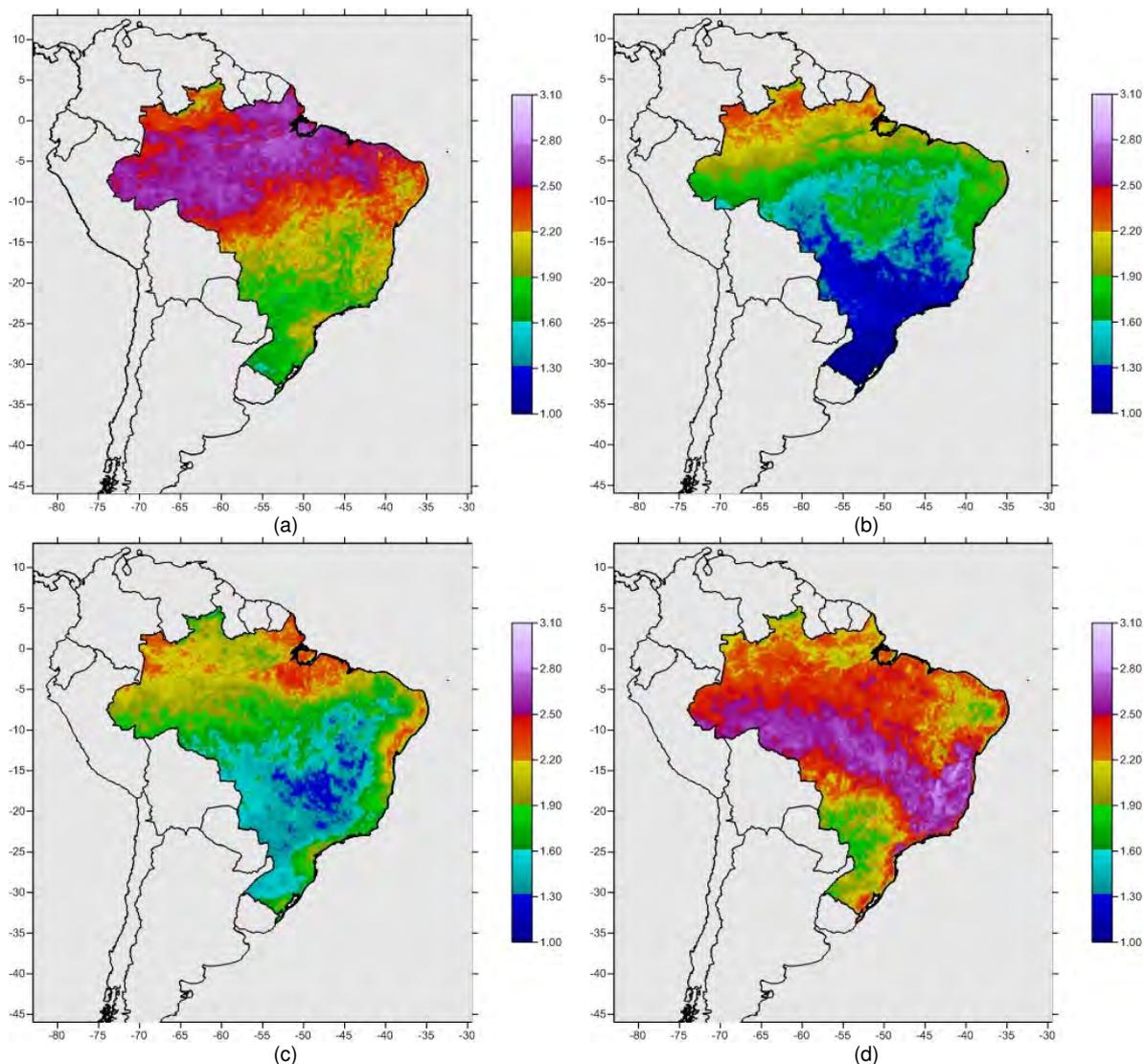


Figura 4.19 – Mapas de irradiação difusa (kWh/m^2) produzidos com resultados do modelo BRASIL-SR utilizando base de dados de visibilidade horizontal climatológica original, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) de 2008.

A figura 4.19 apresenta os mapas de irradiação difusa média diária para 2008. Março apresentou os maiores valores (até $2,9 \text{ kWh/m}^2$) na região Norte,

estendendo-se para o norte da região Nordeste. Os menores valores são verificados nas regiões Sudeste e Sul do país.

O mês de junho (figura 4.19 b), como em todos os anos simulados, apresentou os menores valores de irradiação difusa disponível. Os menores valores (aproximando-se de $1,0 \text{ kWh/m}^2$) foram observados a partir da região Centro-Oeste, estendendo-se latitudinalmente até a região Sul do país. Os maiores valores foram observados no extremo norte do país, chegando a atingir $2,3 \text{ kWh/m}^2$. A irradiação difusa apresentou valores maiores em setembro (figura 4.19 c) que o mês de junho, com máximos no litoral leste no norte do Nordeste, além do estado do Pará. Os menores valores foram observados no centro do país, em torno de $1,2 \text{ kWh/m}^2$. Em dezembro (figura 4.19 d), coerentemente ao verificado na figura 4.15 d, observou-se uma faixa com maiores valores de irradiação difusa se estendendo da região Norte ao Sudeste do país. Já os menores valores foram observados nas regiões Sul e Nordeste, com até $3,0 \text{ kWh/m}^2$.

4.3.4. Conclusões preliminares das simulações de referência com o modelo BRASIL-SR

As simulações realizadas para os meses de março, junho, setembro e dezembro dos anos de 2006, 2007 e 2008, permitiram verificar que o comportamento do modelo BRASIL-SR consegue representar a variabilidade sazonal (com menores valores no mês de junho e maiores valores em dezembro) e interanual da radiação solar incidente na superfície. Os itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 apresentaram os resultados destas simulações.

Verifica-se, através das figuras 4.12, 4.15 e 4.18, que a porção leste da região Centro-Oeste e o oeste da região Nordeste apresentam valores de irradiação

direta média diária sempre acima de $5,0 \text{ kWh/m}^2$, mas atingindo valores acima de $8,0 \text{ kWh/m}^2$ em alguns meses simulados. Estas são regiões de clima Semiárido - com maior quantidade de horas de brilho solar - que influenciam estes valores. A região Sul apresentou valores próximos a estes nos meses de setembro e dezembro, mas possui uma sazonalidade bem mais acentuada.

Sobre esta sazonalidade, valores abaixo de $3,0 \text{ kWh/m}^2$ são observados na região Sul, para o mês de junho nos três anos simulados. Neste caso, o fato desta região sofrer uma maior influência quando na passagem de sistemas frontais pesa na quantidade de irradiação direta disponível. A região Norte e o extremo norte do Nordeste brasileiro também experimentam situações similares, quando há a influência na nebulosidade destas regiões em função do posicionamento da ZCIT, em especial no mês de março. Além disso, a região Amazônica possui altos índices pluviométricos, o que também reduz na quantidade de irradiação direta disponível. No caso das regiões Centro-Oeste e Sudeste, pode-se mencionar a ocorrência de eventos de ZCAS para o mês de dezembro. Em todas estas, houve registro de valores abaixo de $3,0 \text{ kWh/m}^2$.

É importante mencionar que o modelo respondeu de maneira positiva à caracterização meteorológica apresentada no item 4.1, no que diz respeito à precipitação ocorrida nos meses simulados, identificando situações de céu encoberto. Cita-se, por exemplo, a persistência dos episódios de ZCAS ocorridos nos meses de dezembro dos anos de 2006 e 2008, que podem ser facilmente identificados nas figuras de irradiação direta (4.12 d e 4.18 d) e difusa (4.13 d e 4.19 d) destes anos. Os eventos de ZCAS ocorridos no mês de dezembro de 2007 foram curtos e apenas a partir da segunda quinzena, o que não foi suficiente para que uma assinatura deste tipo pudesse ser identificada.

4.4. Simulações com o modelo BRASIL-SR utilizando a base de visibilidade horizontal observada em aeroportos

O modelo BRASIL-SR teve seu código adaptado para que ao invés de utilizar valores fixos em determinadas faixas latitudinais passasse a fazer a leitura de um arquivo de visibilidade horizontal, com valores para cada ponto de grade, de acordo com o que foi apresentado no item 4.2.

Para uma melhor visualização dos resultados, optou-se por apresentar mapas que representassem as diferenças entre os valores obtidos nas simulações realizadas utilizando a base climatológica de visibilidade horizontal e os valores obtidos utilizando a visibilidade horizontal média do mês simulado. Assim, as diferenças positivas (ou negativas) representam os pontos onde as integrações com a base atualizada de visibilidade horizontal geraram menores (maiores) valores, respectivamente.

Percebe-se a presença de linhas latitudinais nos mapas de diferença apresentados mais adiante. Este é um efeito gerado como consequência das faixas latitudinais de visibilidade climatológica, utilizada originalmente pelo modelo BRASIL-SR.

4.4.1. Simulações para o ano de 2006

Os mapas de diferença de irradiação global para o ano de 2006 são mostrados na figura 4.20. Observa-se em março (figura 4.20 a) que os maiores valores estão nas regiões Centro-Oeste e Sul do Brasil, além de algumas regiões no litoral brasileiro, do Rio de Janeiro até o Pará, com valores de diferença que chegam a atingir $0,19 \text{ kWh/m}^2$ na região Sul.

O mapa de diferença de irradiação global de junho de 2006 (figura 4.20 b) é bastante similar ao do mês de março, no que se refere as regiões com maiores diferenças, mas estes valores são menos acentuados. As maiores diferenças também são observadas nas regiões Centro-Oeste e Sul, com máximos em torno de 0,11 kWh/m².

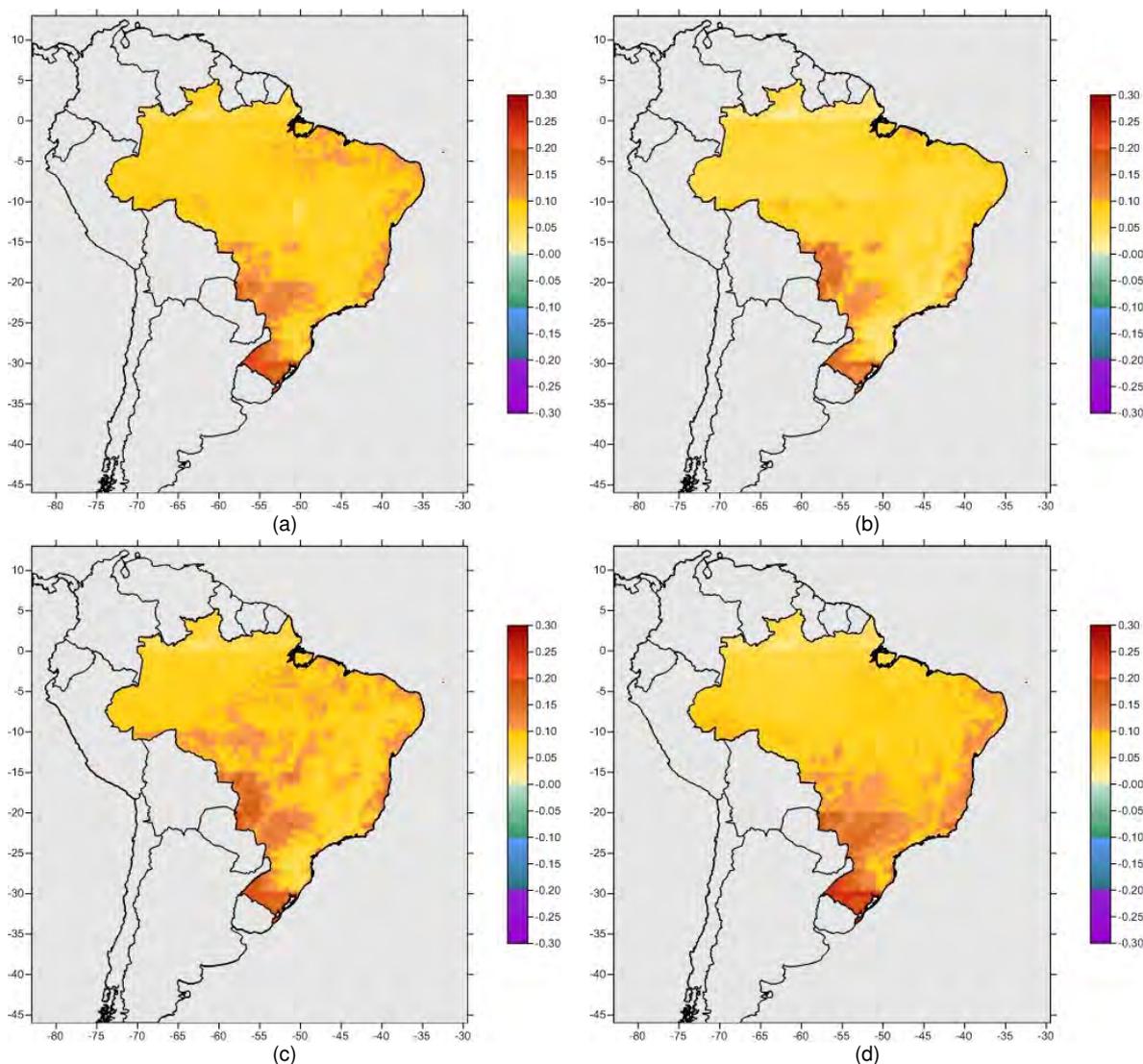


Figura 4.20 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.

As diferenças aumentam nos meses de setembro e dezembro, em todo o país. Vários núcleos com diferenças acima de 0,10 kWh/m² passam a ser

observadas em todas as regiões (figura 4.20 c). Foram observadas diferenças nos resultados das simulações de até $0,21 \text{ kWh/m}^2$ no Rio Grande do Sul. Maiores diferenças foram observadas em dezembro (figura 4.20 d), mas estas estão menos distribuídas espacialmente.

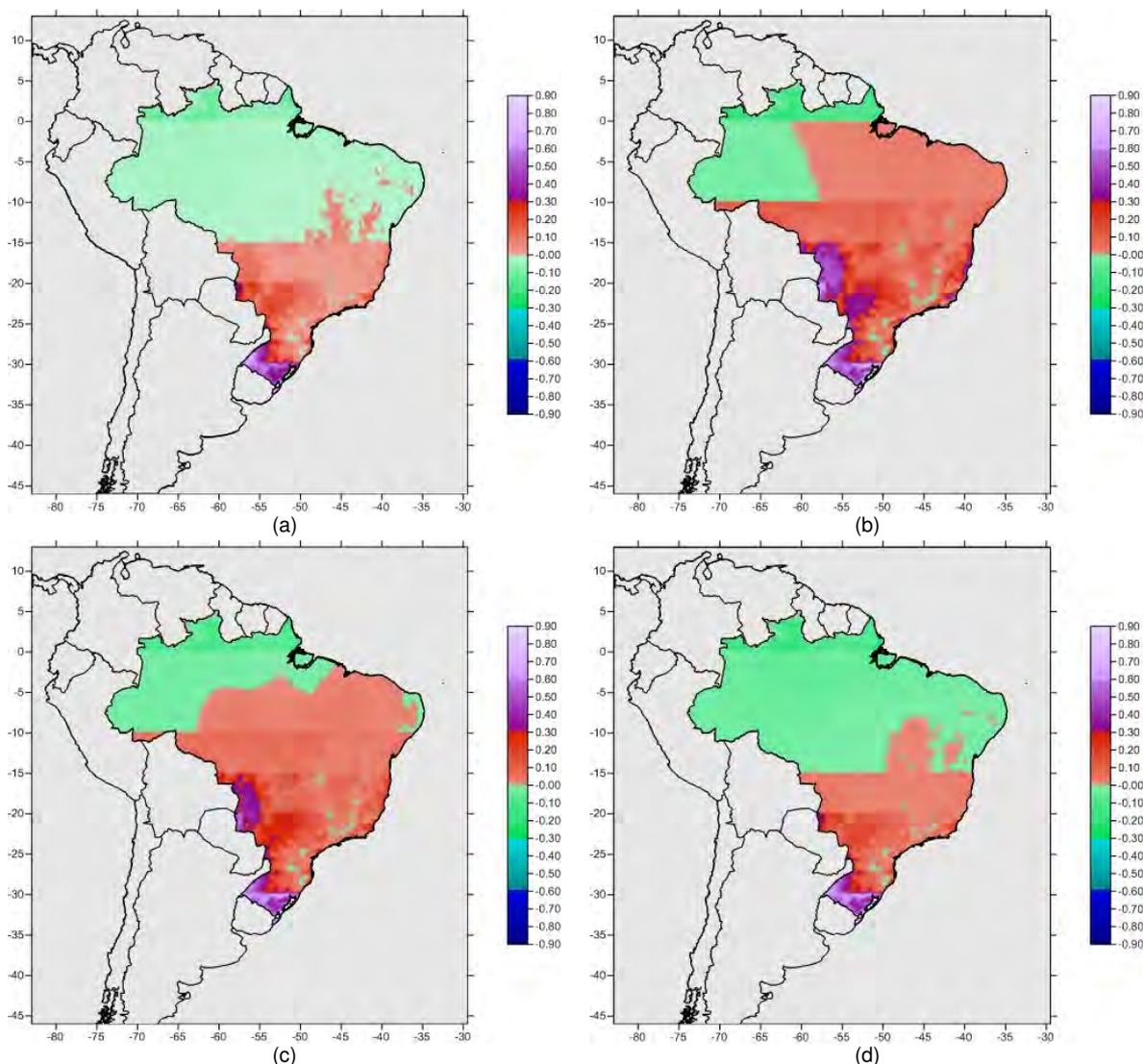


Figura 4.21 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.

Os maiores valores estiveram, mais uma vez, nas regiões Centro-Oeste, na faixa leste do Brasil e na região Sul, onde os máximos estão em torno de $0,24 \text{ kWh/m}^2$. Os mapas de diferença de irradiação direta (figura 4.21) mostraram valores positivos e negativos no território brasileiro.

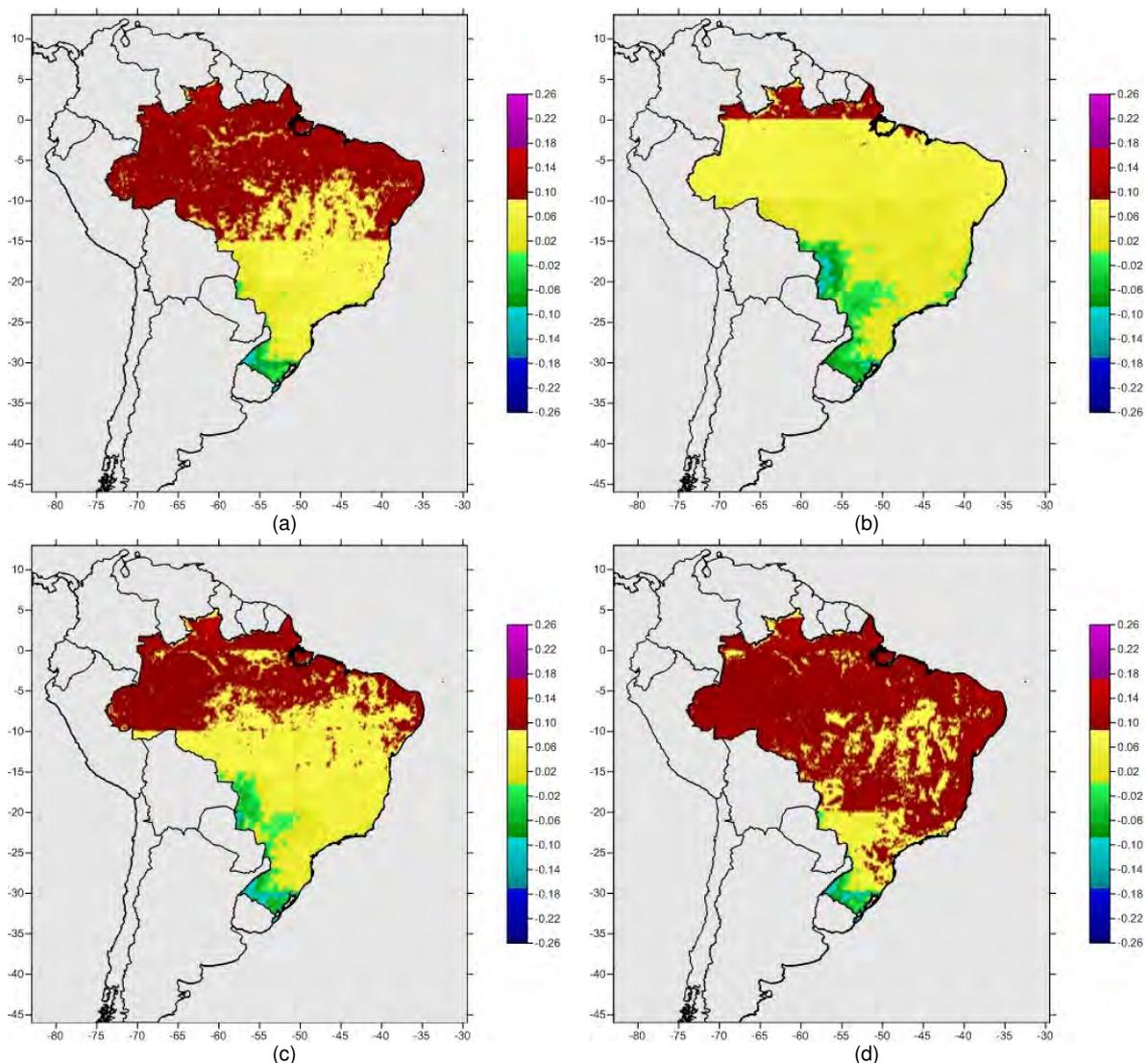


Figura 4.22 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.

Março (figura 4.21 a) apresentou diferenças negativas ou bem próximas a zero até a faixa latitudinal de 15°S e a partir deste ponto, passou a apresentar diferenças positivas, com máximos nas regiões Centro-Oeste e Sul, próximos a $0,51 \text{ kWh/m}^2$.

Junho (figura 4.21 b) apresentou diferenças na mesma ordem de grandeza, mas com valores positivos observados em toda a região Nordeste e em grande parte da região Norte. Há também um aumento da diferença entre as

simulações na região Centro-Oeste. Já para setembro (figura 4.21 c) obteve-se um mapa de diferença similar ao observado em junho, mas com valores ligeiramente menores, chegando a $0,58 \text{ kWh/m}^2$ na região Sul. Dezembro (figura 4.21 d) tem um mapa de diferenças mais próximo ao observado em março, onde são observadas diferenças positivas ou próximas a zero em grande parte do país, até a faixa latitudinal de 15° S . As maiores diferenças estão, mais uma vez, na região Sul do país, atingindo $0,58 \text{ kWh/m}^2$.

Já os mapas de irradiação difusa (figura 4.22) apresentaram valores positivos na maior parte do país. Março apresentou valores de até $0,13 \text{ kWh/m}^2$ no extremo norte do Brasil e valores negativos apenas no Rio Grande do Sul, em torno de $-0,9 \text{ kWh/m}^2$. Nos meses de junho (figura 4.22 b) e setembro (figura 4.22 c) observou-se comportamentos similares, mas regiões com valores negativos foram observadas na região Centro-Oeste e Sul, com valores de $-0,11 \text{ kWh/m}^2$ e $-0,13 \text{ kWh/m}^2$, respectivamente. Em dezembro (figura 4.22 d) destacam-se as diferenças positivas em quase todo o território brasileiro, atingindo até $0,12 \text{ kWh/m}^2$. Diferenças negativas inferiores a $0,9 \text{ kWh/m}^2$ foram observadas no extremo sul do país.

4.4.2. Simulações para o ano de 2007

As diferenças na irradiação global fornecida pelas duas simulações são apresentadas na figura 4.23. Diferenças positivas foram observadas em todo o território brasileiro no mês de março de 2007 (figura 4.23 a), com maiores valores, mais uma vez, verificados nas regiões Centro-Oeste e Sul, de até $0,13 \text{ kWh/m}^2$. Junho (figura 4.23 b) mostrou um cenário similar ao apresentado em março, apenas com uma discreta diminuição das diferenças obtidas. Mais uma vez, destacam-se as máximas diferenças nas regiões Centro-Oeste e Sul, desta vez em torno de $0,13 \text{ kWh/m}^2$.

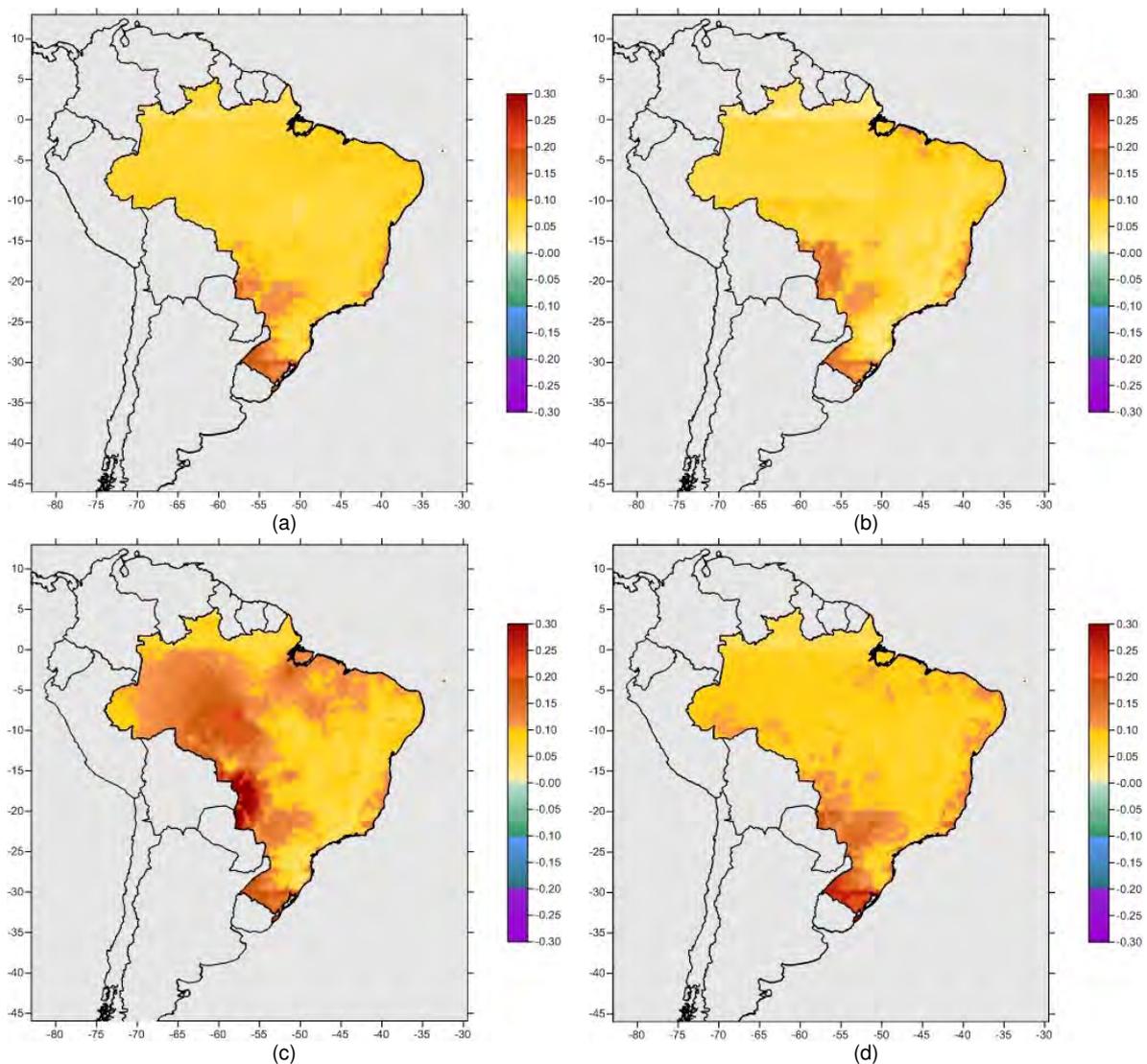


Figura 4.23 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.

Já o mês de setembro (figura 4.23 c) apresentou diferenças bem mais evidentes, com valores acima de $0,12 \text{ kWh/m}^2$ em grande parte das regiões Norte, Centro-Oeste e Sul, e valores acima de $0,30 \text{ kWh/m}^2$ no Centro-Oeste. Em dezembro (figura 4.23 d) as diferenças diminuem, mas ainda são observados valores de até $0,21 \text{ kWh/m}^2$ na região Sul do país.

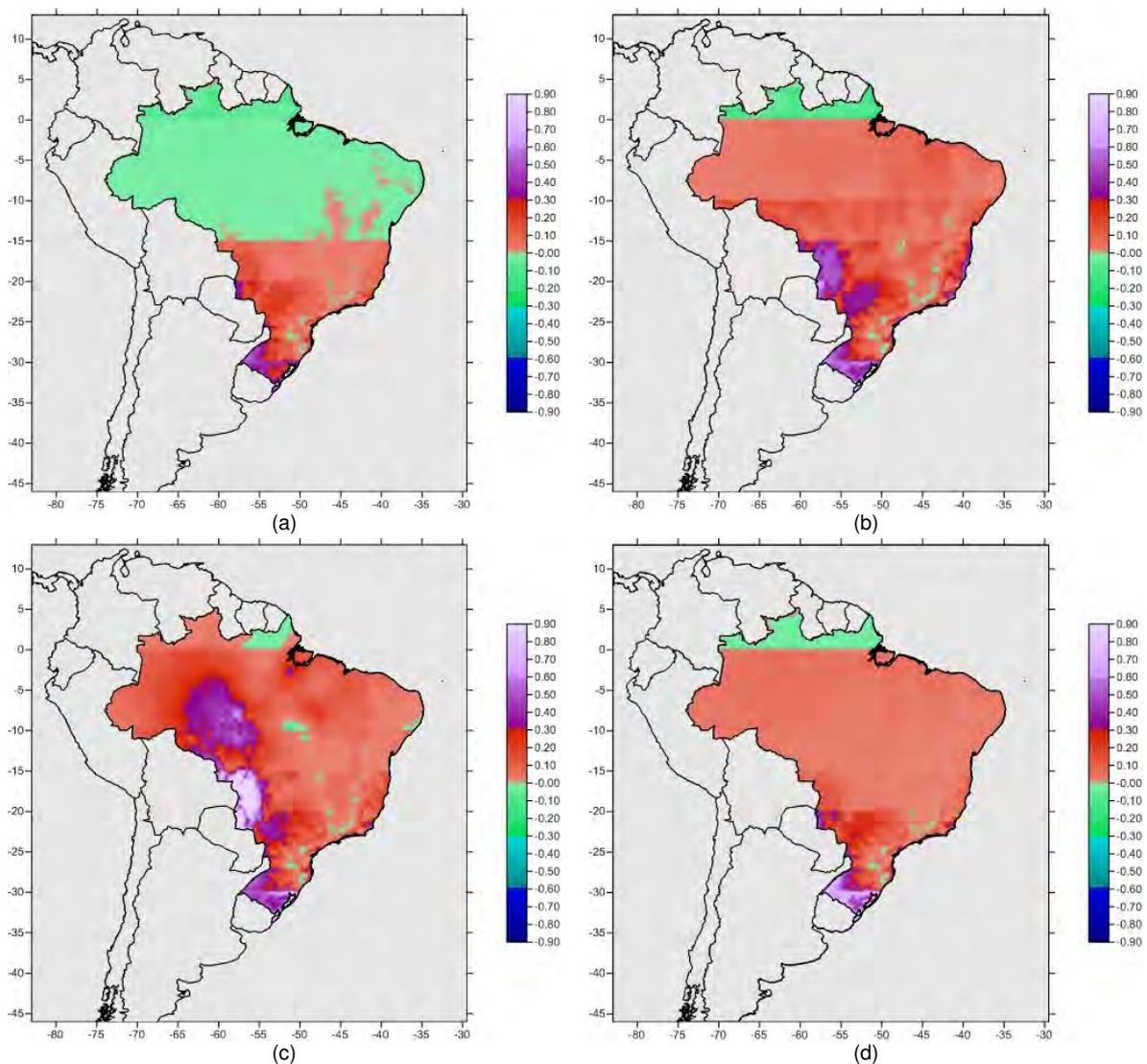


Figura 4.24 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.

Os mapas de diferença de irradiação direta para o ano de 2007 são mostrados na figura 4.24. Observa-se que, assim como no ano de 2006 (figura 4.21 a), os valores negativos foram observados até a faixa latitudinal de 15 S, com pequenas regiões positivas no Nordeste. As maiores diferenças, de até $0,49 \text{ kWh/m}^2$, foram observadas na região Sul.

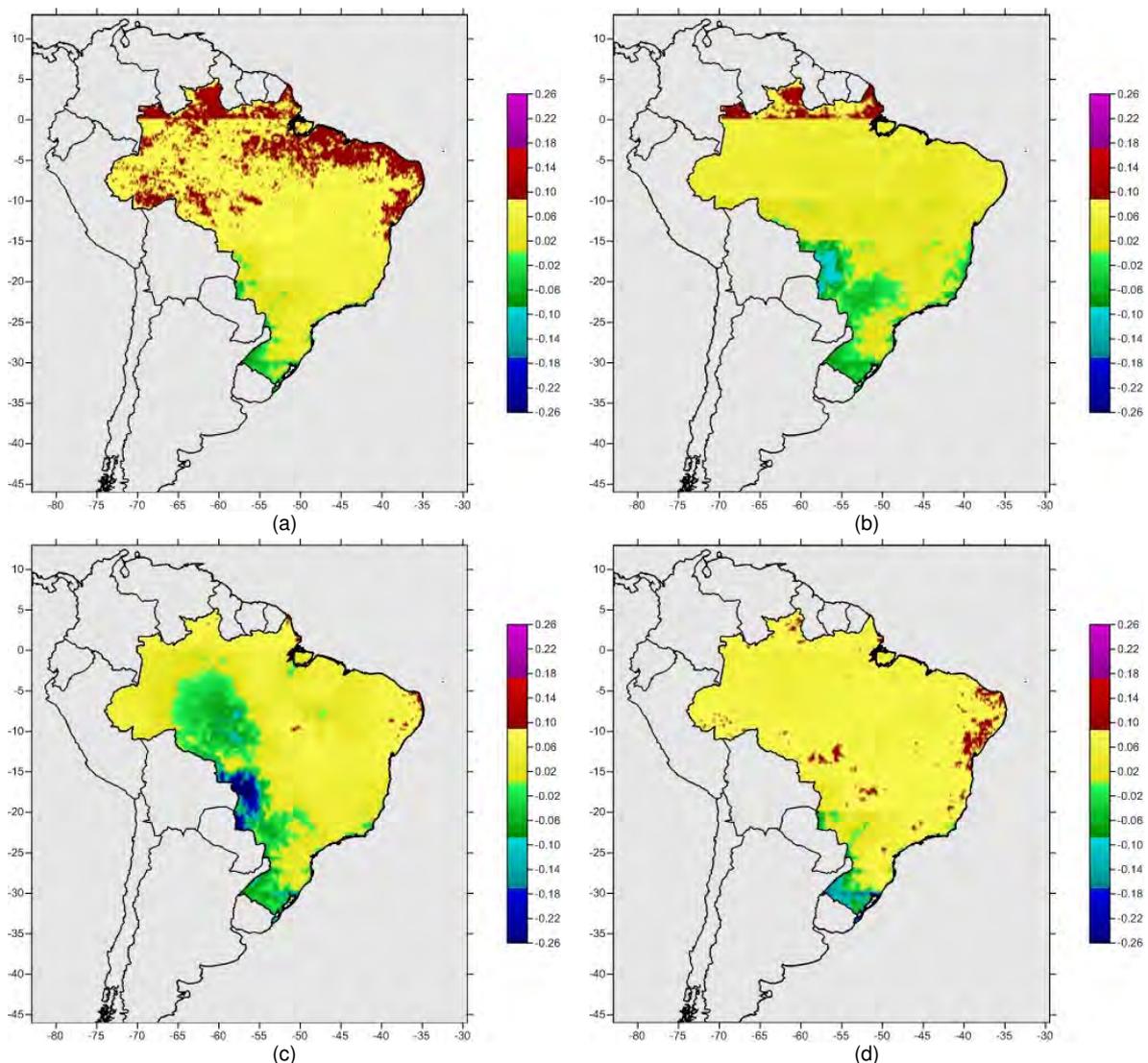


Figura 4.25 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.

O mês de junho (figura 4.24 b) mostrou valores negativos apenas no extremo norte do país e as regiões onde as maiores diferenças positivas foram observadas, mais uma vez, na porção oeste do Centro-Oeste e o sul da região Sul, com valores de até $0,59 \text{ kWh/m}^2$.

Setembro (figura 4.24 c) apresentou diferenças positivas em praticamente todo o território brasileiro, mas regiões bem definidas podem ser observadas na região Norte, Centro-Oeste e Sul, com valores acima de $0,9 \text{ kWh/m}^2$. Já o mês

de dezembro (figura 4.24 d) voltou a apresentar uma redução destas diferenças, mas os valores positivos permanecem na maior parte do país. As maiores diferenças positivas foram observadas na região Sul, atingindo 0,59 kWh/m².

As diferenças verificadas nos mapas de irradiação difusa (figura 4.25) foram essencialmente positivas em todo o território brasileiro nas simulações realizadas para o ano de 2007. Com isso, assim como nos mapas de diferença de irradiação direta deste ano (figura 4.24), as diferenças foram mais evidentes no mês de setembro (figura 4.25 c), quando valores de até -0,32 kWh/m² foram observados na região Centro-Oeste. O mês de junho é aquele em que mais diferenças negativas foram observadas, inclusive no Centro-Oeste do país, onde valores de até -0,11 kWh/m² são verificados. Nos meses de março (figura 4.25 a) e dezembro (figura 4.25 d), as maiores diferenças negativas foram observadas no estado do Rio Grande do Sul, atingindo -0,06 kWh/m² e -0,17 kWh/m², respectivamente.

4.4.3. Simulações para o ano de 2008

Os mapas de diferença de irradiação global para o ano de 2008 (figura 4.26) mostram valores positivos ou próximos de zero em todos os meses simulados. Março e junho (figuras 4.26 a e 4.26 b) são os meses onde estas diferenças foram maiores e mais homogêneas em todo o país, sendo os maiores valores verificados nas regiões Centro-Oeste, norte da região Nordeste e região Sul, onde atingiram 0,26 kWh/m² em março.

Setembro e dezembro (figura 4.26 c e figura 4.26 d) apresentaram um comportamento distinto, com diferenças negativas em grande parte da região central do país, estendendo-se à região Norte, ao leste do Nordeste e ao Sudeste. Porém, estas diferenças estiveram em torno de -0,01 kWh/m². O mapa de setembro apresentou regiões com diferenças mínimas da mesma magnitude na porção leste do território brasileiro. As maiores diferenças estiveram, em ambos os mapas, na ordem de 0,19 kWh/m² na região Sul.

Observando os mapas de diferença de irradiação direta (figura 4.27), verificam-se valores positivos em todo o território brasileiro (exceto no extremo norte do país), durante todo o ano. As diferenças foram sempre maiores no sul do Rio Grande do Sul, atingindo 0,71 kWh/m² em dezembro (figura 4.27 d). No Centro-Oeste do país também foram observadas diferenças significativas, em especial nos meses de junho (figura 4.27 b) e setembro (figura 4.27 c), atingindo até 0,59 kWh/m² e 0,57 kWh/m², respectivamente.

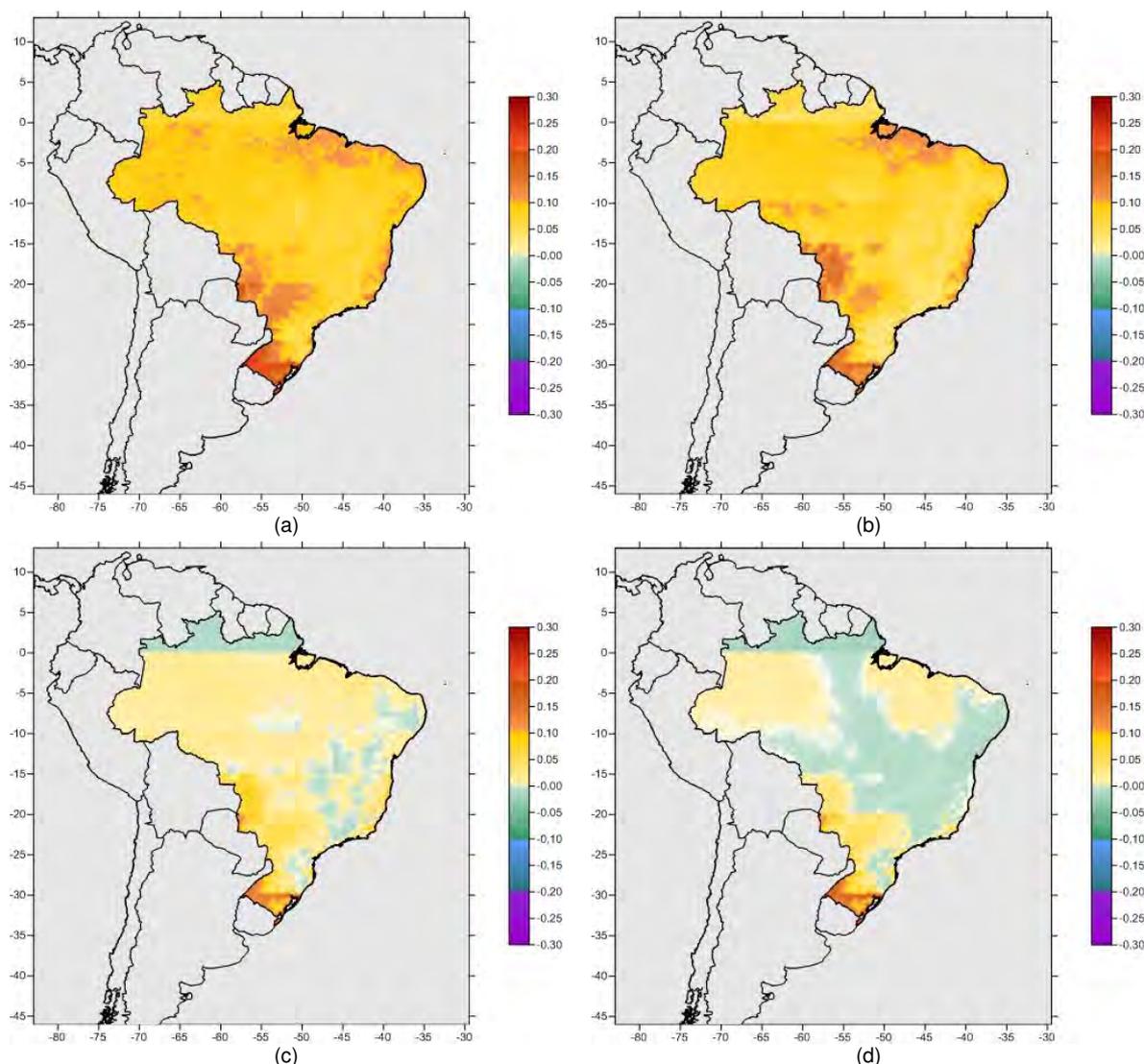


Figura 4.26 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.

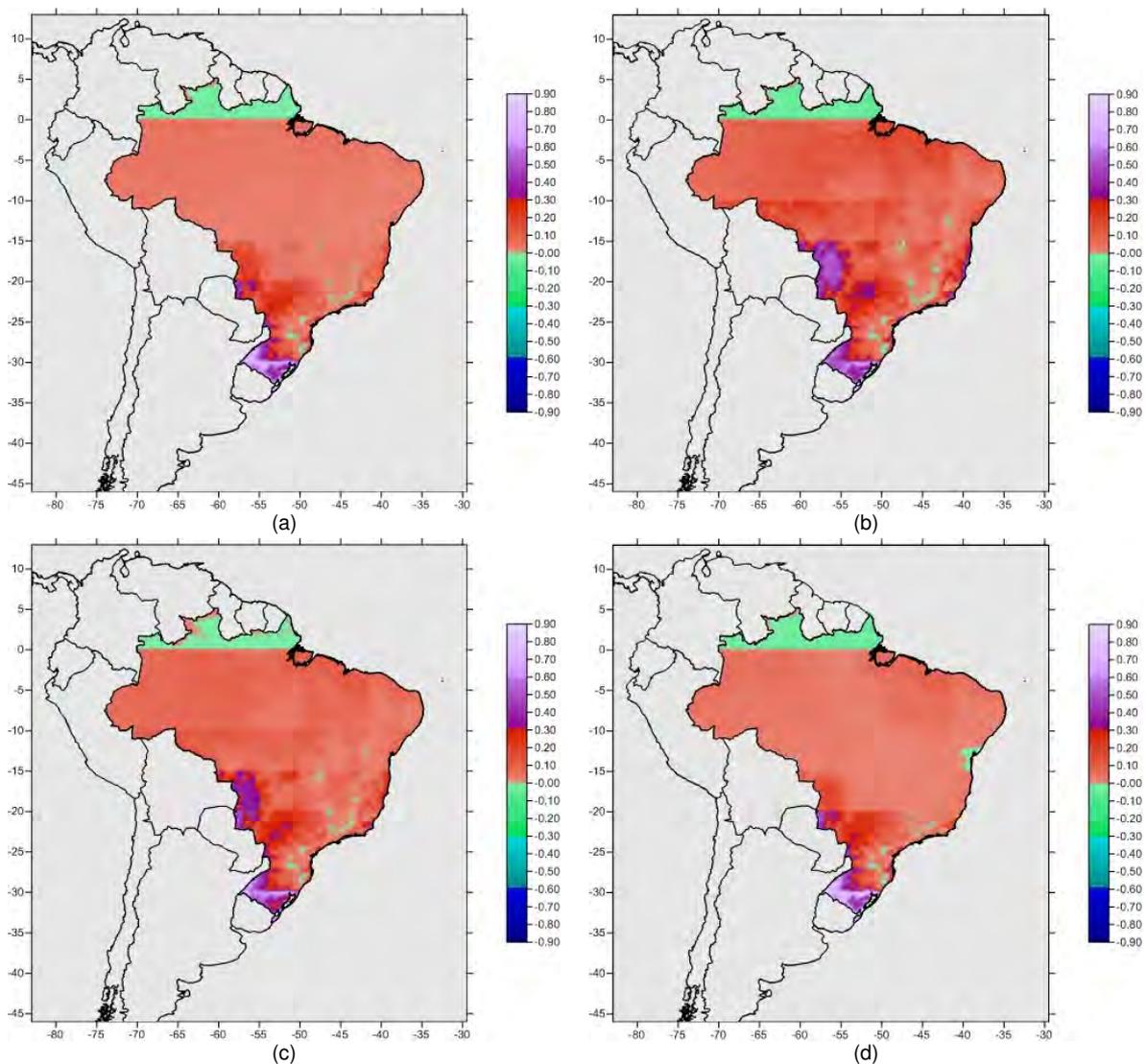


Figura 4.27 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.

Nos mapas de diferença de irradiação difusa das simulações do ano de 2008 (figura 4.28), observam-se valores positivos na maior parte do território brasileiro nos meses de março e junho, mas estas diferenças foram invertidas nos meses de setembro e dezembro.

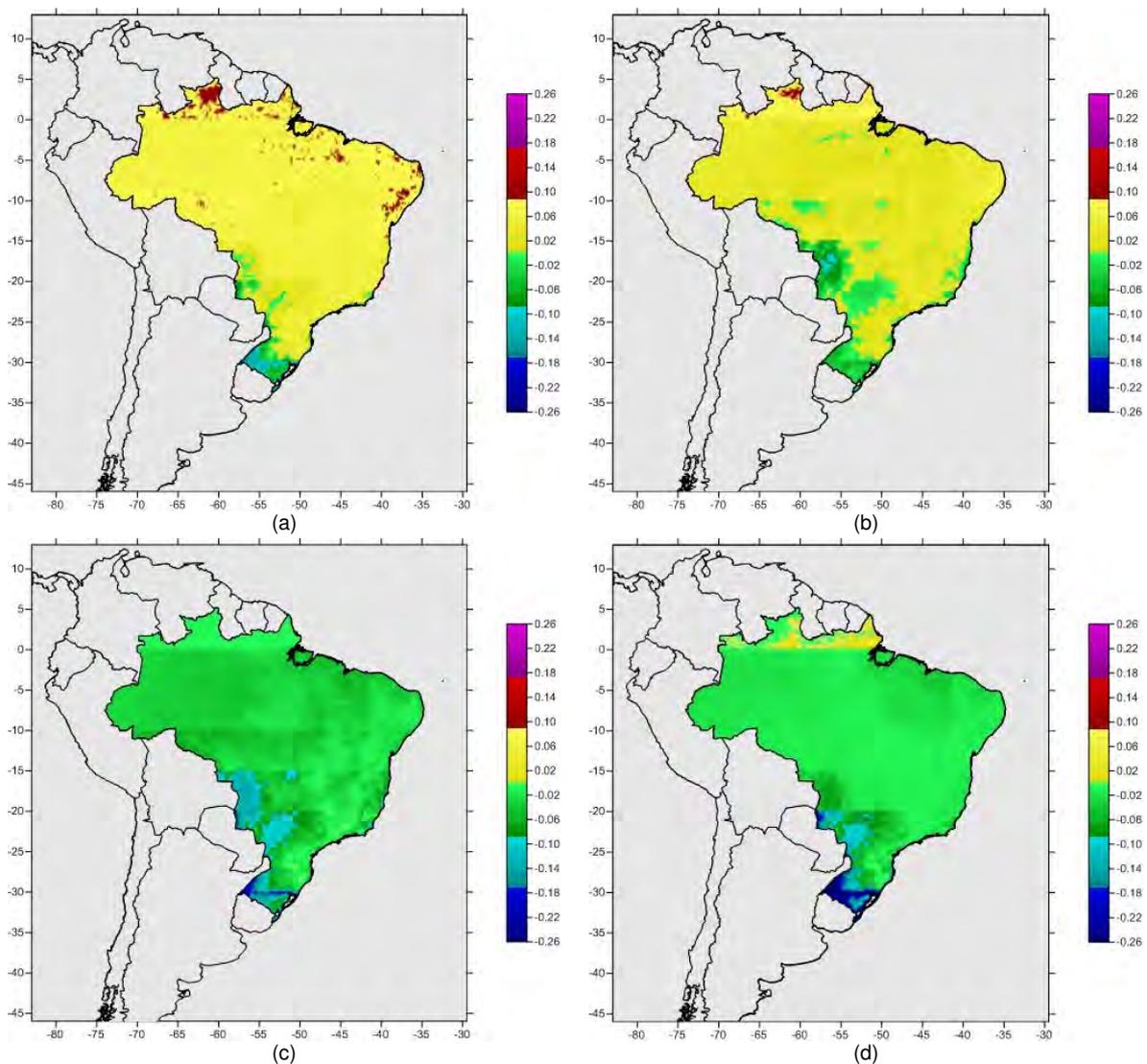


Figura 4.28 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações utilizando a visibilidade horizontal atualizada, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.

As maiores diferenças negativas dos meses de março (figura 4.28 a) e junho (figura 4.28 b) foram observadas nas regiões Sul ($0,13 \text{ kWh/m}^2$) e Centro-Oeste ($0,11 \text{ kWh/m}^2$), respectivamente. As mesmas regiões Centro-Oeste e Sul também apresentaram diferenças negativas para os meses de setembro ($0,13 \text{ kWh/m}^2$) e dezembro ($0,23 \text{ kWh/m}^2$).

4.4.4. Conclusões preliminares das simulações com a base de visibilidade horizontal atualizada

Os mapas de diferença apresentados representam os valores obtidos nas simulações utilizando a base climatológica de visibilidade subtraídos daqueles obtidos nas simulações utilizando a base de visibilidade atualizada. Em todos eles, são exibidas linhas latitudinais, reflexo dos valores climatológicos de visibilidade horizontal.

Em todos os mapas de diferença apresentados, os valores positivos ou negativos exibidos, são resultado apenas das alterações nos valores de visibilidade horizontal como tentativa de uma melhor caracterização da quantidade da carga média mensal de aerossóis. As diferenças acontecem em função da redução da visibilidade horizontal devido aos aerossóis ou mesmo em devido aos valores de visibilidade climatológica no centro-sul do país serem bastante elevados, o que acabou gerando grandes diferenças nos resultados das simulações mensais.

É válido mencionar que a adequação da base de visibilidade horizontal proporcionou não só diminuição dos valores de visibilidade nas regiões de ocorrência de queima de biomassa e regiões metropolitanas, mas também um aumento da visibilidade, em especial no norte e no nordeste do país em alguns meses do ano. Isso explica o fato de haver valores positivos e negativos nos mapas de diferença apresentados – irradiação global, irradiação direta e irradiação difusa.

Considerando apenas o processo de atenuação por aerossóis e sem aprofundar as demais interações, espera-se que com a diminuição da visibilidade horizontal a carga de aerossóis seja incrementada e conseqüentemente ocorra a redução da irradiação global e da irradiação direta, assim como o aumento da irradiação difusa. Percebe-se, através dos mapas de

diferença apresentados que em diversos meses ocorreram situações como estas; o que remete às diferentes caracterizações da quantidade de aerossóis atmosféricos, já que estamos avaliando um país de dimensões continentais como o Brasil.

Todos os anos apresentaram as esperadas diferenças, em função das alterações de visibilidade horizontal, sendo o ano de 2007 aquele onde estas diferenças foram mais evidentes. Isso já era esperado, já que como apresentado nos itens 4.1 e 4.2, este ano foi não um ano com excessiva quantidade de queimadas, como também aquele que, dentre os três anos simulados, aquele onde a variabilidade sazonal da visibilidade horizontal foi mais acentuada.

Como mencionado anteriormente, algumas diferenças persistentes também foram observadas, como os valores extremos observados na região Sul do Brasil, em especial no estado do Rio Grande do Sul. Acredita-se que isto seja efeito da grande diferença de valores de visibilidade horizontal verificada nesta região entre as bases utilizadas.

4.5. Simulações com o modelo BRASIL-SR utilizando visibilidade horizontal estimada pela espessura óptica dos aerossóis obtidas pelo modelo CATT-BRAMS

Para avaliar o desempenho do modelo BRASIL-SR com a base de dados de visibilidade estimada a partir dos dados de espessura óptica de aerossóis fornecidos pelo modelo CATT-BRAMS, foram realizadas simulações para os mesmos meses, dos anos de 2006 a 2008. Da mesma forma, foi realizada a comparação destas simulações com as simulações de referência por meio de mapas de diferenças, conforme descrito no tópico anterior.

4.5.1. Simulações para o ano de 2006

Os mapas de diferença de irradiação global para o ano de 2006 são mostrados na figura 4.29. O mês de março (figura 4.29 a) apresentou as menores diferenças entre a simulação referência e a simulação com a visibilidade obtida pelo modelo CATT-BRAMS neste ano, com valores entre $-0,22 \text{ kWh/m}^2$ (extremo norte do país) e $0,10 \text{ kWh/m}^2$ (região sudeste) no território brasileiro. A partir do mês de junho (figura 4.29 b), essas diferenças se apresentam com núcleos mais definidos, atingindo valores menores que $-0,3 \text{ kWh/m}^2$ na região Norte do país e $0,25 \text{ kWh/m}^2$ na região Centro-Oeste. Em setembro (figura 4.29 c) foram verificados valores entre $-0,29 \text{ kWh/m}^2$ na região Norte do país e $0,28 \text{ kWh/m}^2$ no centro-norte. Em dezembro (figura 4.29 d), as regiões onde são verificadas as maiores diferenças são as regiões Norte (menores que $-0,30 \text{ kWh/m}^2$) e entre os estados do Maranhão, Pará e Tocantins (atingindo $0,5 \text{ kWh/m}^2$).

Os mapas de diferença de irradiação direta das simulações do ano de 2006 (figura 4.30) praticamente só apresentaram diferenças negativas para o território brasileiro no mês de março (figura 4.30 a), atingindo valores superiores a $-0,9 \text{ kWh/m}^2$. Em junho (figura 4.30 b), uma região com valores positivos foi verificada entre o Norte e Centro-Oeste do país, com valores de até $0,95 \text{ kWh/m}^2$. A maior parte das regiões Centro-Oeste e Norte apresentaram valores positivos no mês de setembro (figura 4.30 c), com diferenças que chegam a até $1,1 \text{ kWh/m}^2$. Em dezembro, os núcleos positivos apresentaram maiores diferenças entre os estados do Maranhão, Pará e Tocantins, em até $1,3 \text{ kWh/m}^2$.

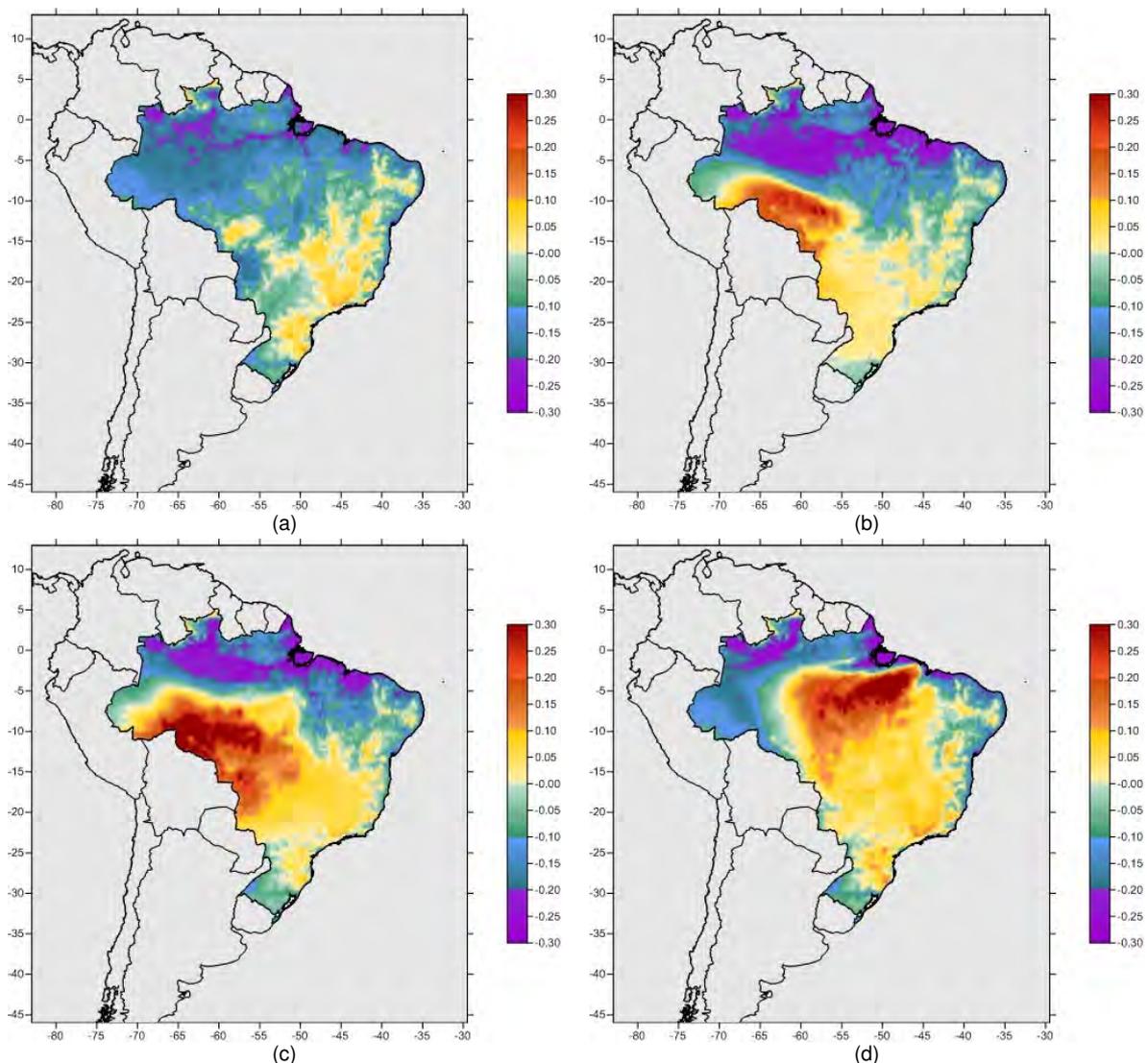


Figura 4.29 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.

Os mapas de diferença de irradiação difusa das simulações do ano de 2006 (figura 4.31), como esperado, apresentam-se de forma coerente aos mapas de irradiação global e direta (figuras 4.29 e 4.30), com o mês de março (figura 4.31 a) apresentando valores positivos em toda extensão do território brasileiro. São verificados valores máximos de até $0,42 \text{ kWh/m}^2$. Junho (figura 4.31 b) apresentou núcleos de valores negativos entre os estados do Mato Grosso e

Rondônia, com valores chegando a até $-0,26 \text{ kWh/m}^2$, mas valores positivos de diferença foram predominantes no restante do país.

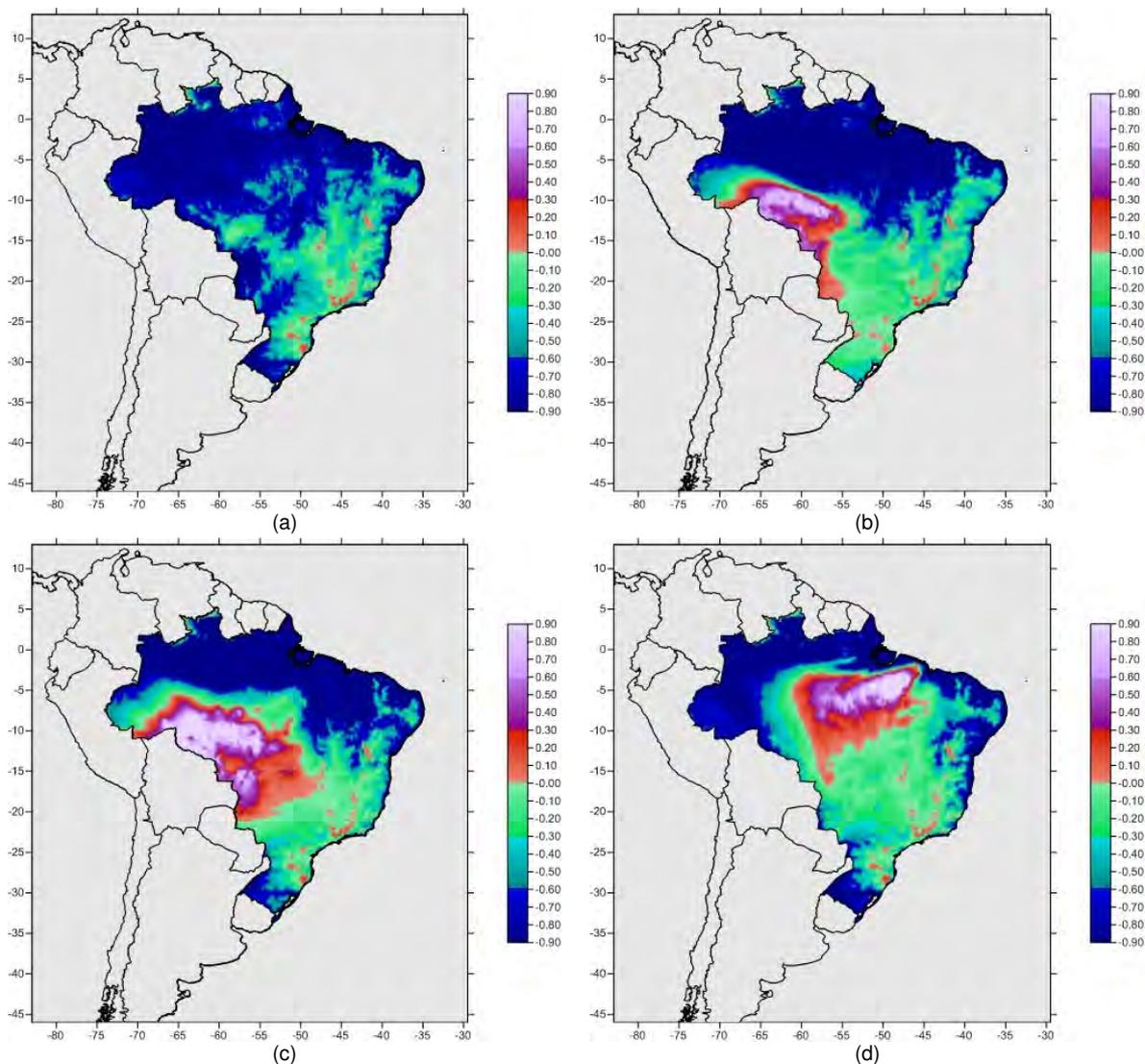


Figura 4.30 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.

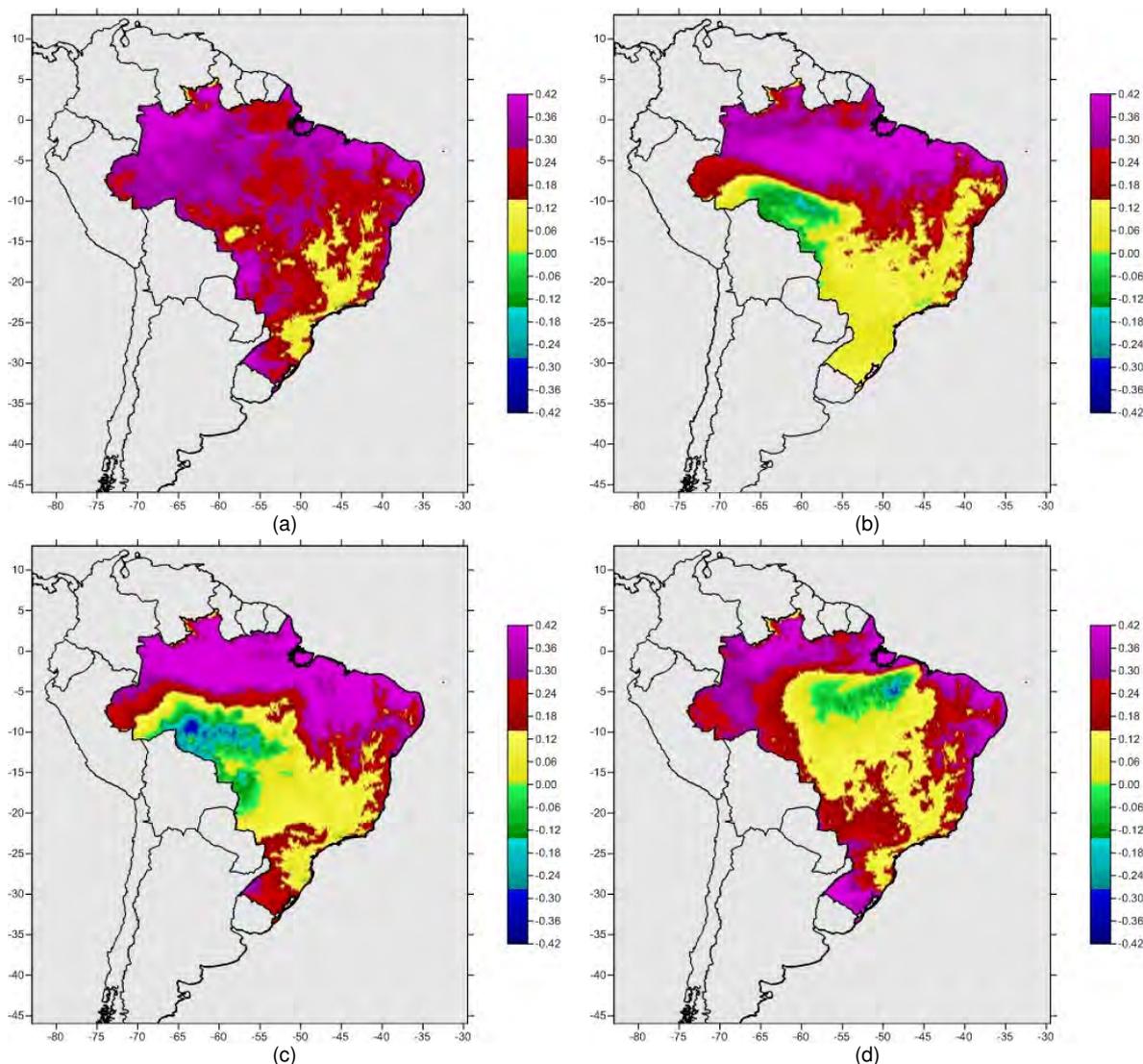


Figura 4.31 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2006.

O mês de setembro (figura 4.31 c) apresentou uma expansão da área de diferenças negativas observada em junho, com valores negativos (máximos de $-0,34 \text{ kWh/m}^2$) também em parte do estado do Mato Grosso do Sul. Dezembro, por sua vez, apresenta valores negativos entre o Nordeste e o Norte, com valores de até $-0,32 \text{ kWh/m}^2$.

4.5.2. Simulações para o ano de 2007

Os mapas de diferença de irradiação global para o ano de 2007 são mostrados na figura 4.32. O mês de março (figura 4.32 a) apresentou valores negativos de diferença entre as simulações em quase todo o território brasileiro, mas apresenta valores positivos de até $0,24 \text{ kWh/m}^2$ no estado de Roraima. No Mato Grosso e entre as regiões Sul, Sudeste e Nordeste, também foram observadas diferenças positivas. Em junho (figura 4.32 b), valores positivos de diferença surgiram de maneira bem mais frequente no território brasileiro, com valores acima de $0,30 \text{ kWh/m}^2$ nos estados de Rondônia, Amazonas e Mato Grosso, e diferenças menores nas regiões Sul, Sudeste e parte do Centro-Oeste. Setembro (figura 4.32 c) apresentou diferenças positivas em praticamente todo o território brasileiro, mas nos estados do Mato Grosso e Rondônia, algumas regiões apresentam diferenças de até $0,9 \text{ kWh/m}^2$. Em dezembro (figura 4.32 d), o mapa de diferença tem característica similar ao de março, com diferenças positivas em parte das regiões Sul, Sudeste e Nordeste.

A figura 4.33 apresenta os mapas de diferença de irradiação direta para o ano de 2007. Março apresentou regiões com diferenças positivas no estado de Roraima (chegando a até $0,26 \text{ kWh/m}^2$), Mato Grosso e parte das regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Junho (figura 4.33 b) apresentou um aumento da área com diferenças positivas na região Centro-Oeste, onde as maiores diferenças atingiram valores de até $1,9 \text{ kWh/m}^2$.

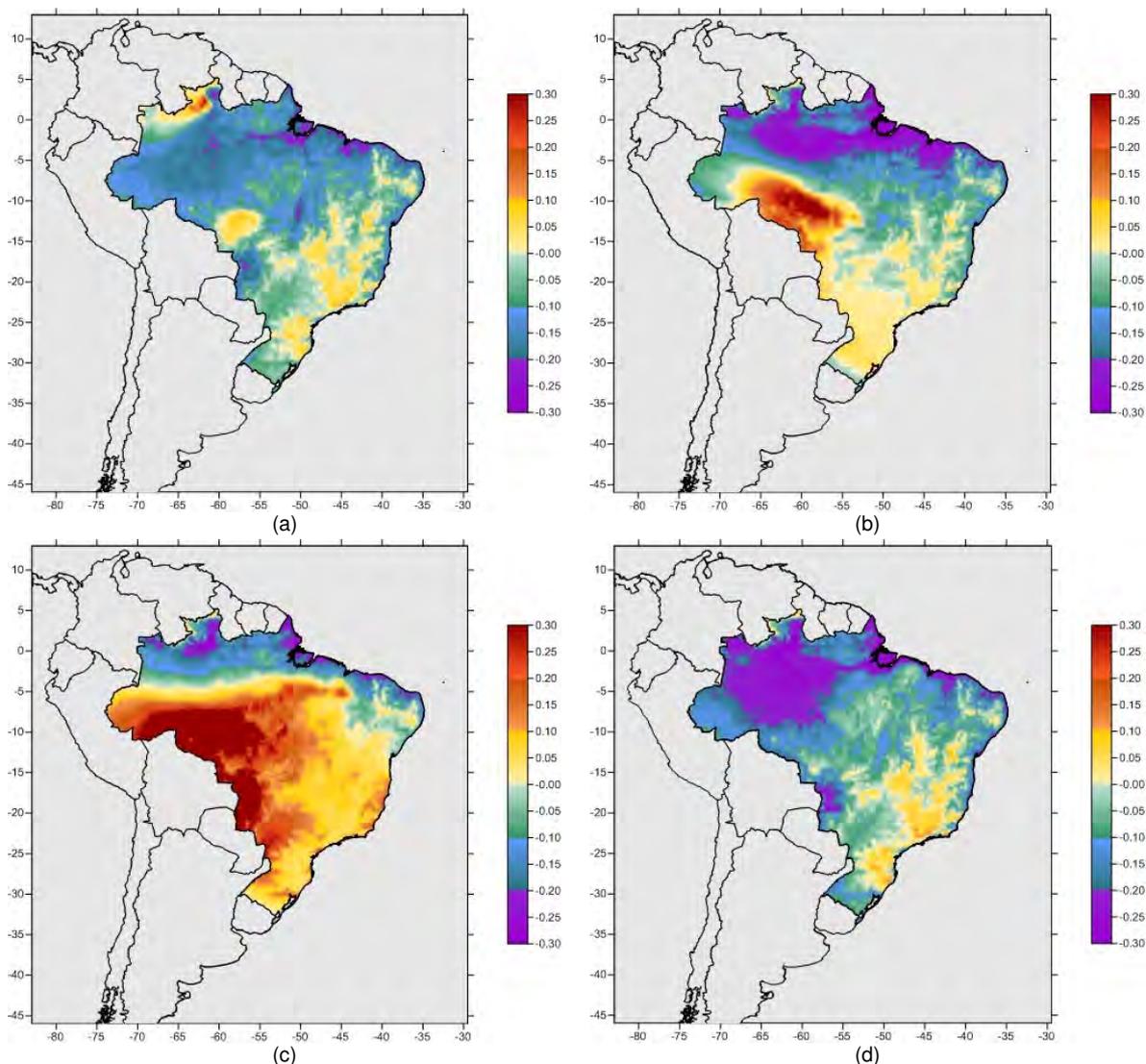


Figura 4.32 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.

Em setembro, valores positivos de diferença foram observados em grande parte do país (figura 4.33 c), com extensas áreas nas regiões Centro-Oeste e Norte apresentando as maiores diferenças entre as simulações. Os estados de Rondônia e Mato Grosso apresentaram pontos de diferenças de até $2,9 \text{ kWh/m}^2$. Dezembro, por sua vez, apresentou diferenças negativas na maior parte do território, mas próximas a $-0,10 \text{ kWh/m}^2$.

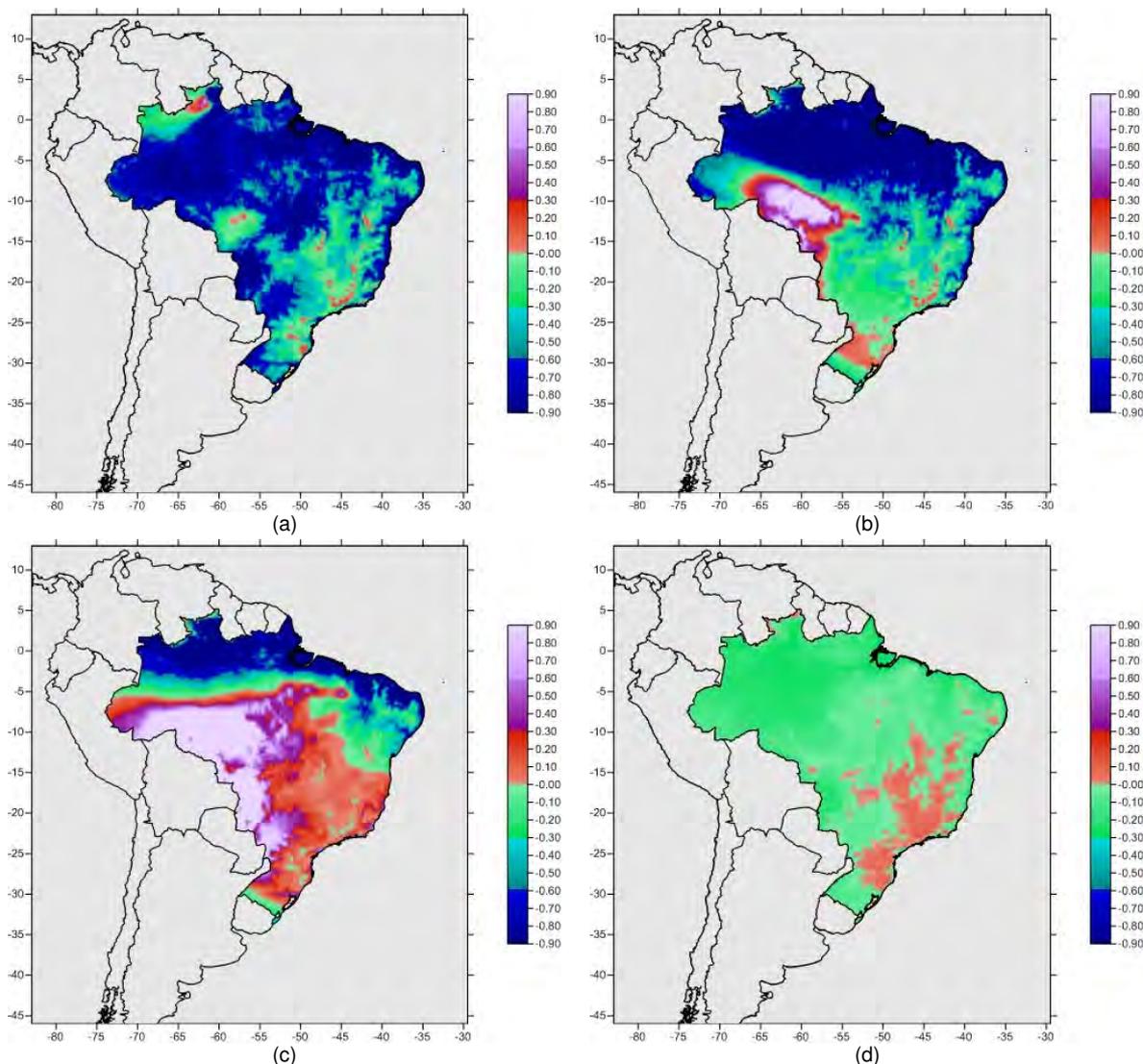


Figura 4.33 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.

Os mapas de diferença de irradiação difusa das simulações do ano de 2007 são exibidos na figura 4.34, e também se apresentam de forma coerente aos mapas de diferença de irradiação global e direta. Março (figura 4.34 a) apresentou diferenças positivas em todo o território brasileiro, mas essas são próximas de zero nas regiões onde houve diferença negativa na irradiação global e direta. Junho (figura 4.34 b) apresentou valores negativos de diferença de até $-0,37 \text{ kWh/m}^2$ no estado do Mato Grosso, enquanto que em setembro

(figura 4.34 c) estas diferenças são da ordem de $-0,90 \text{ kWh/m}^2$ na mesma região. Em dezembro (figura 4.34 d), o mapa de diferença é similar ao verificado no mês de março do mesmo ano.

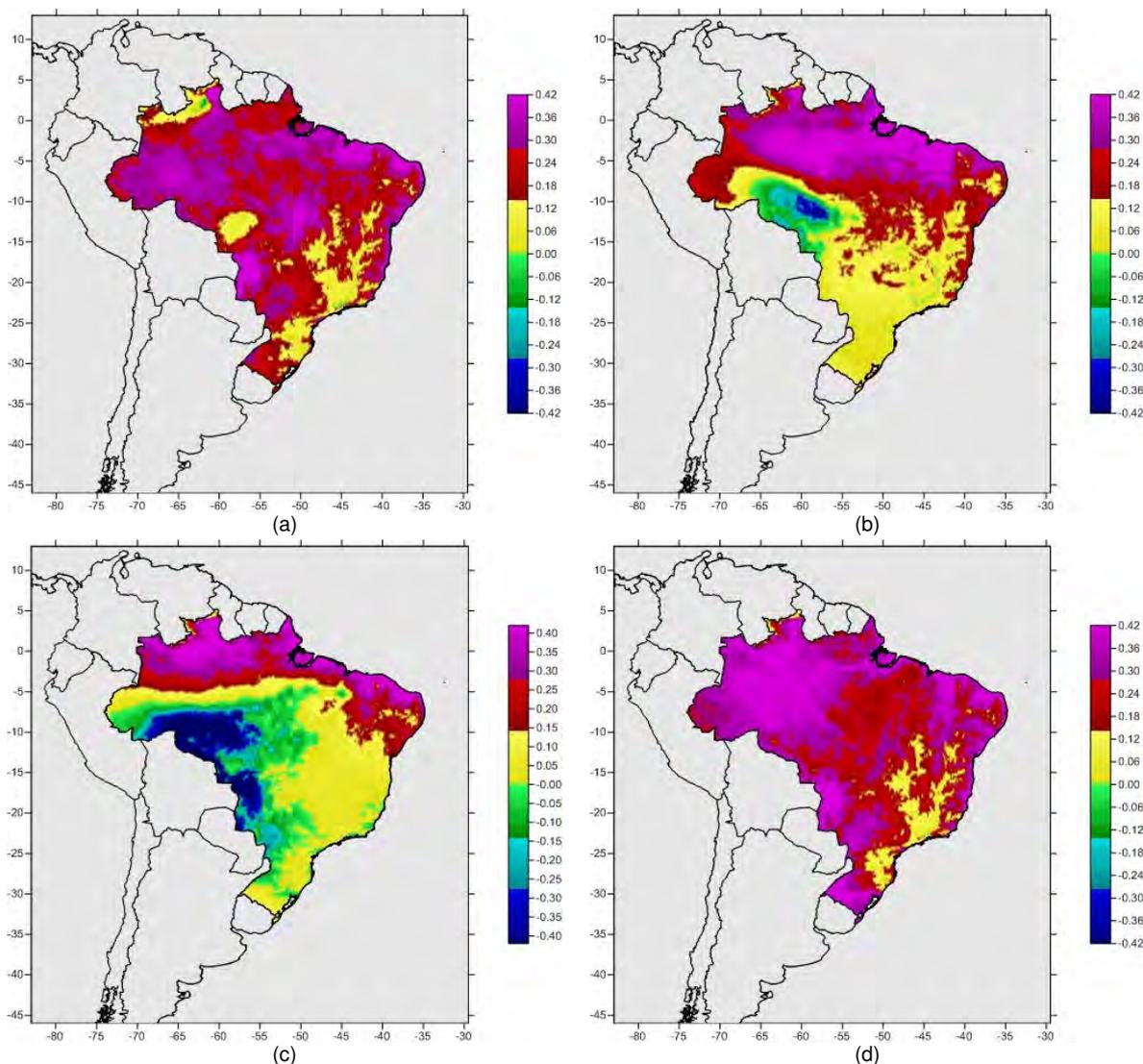


Figura 4.34 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2007.

4.5.3. Simulações para o ano de 2008

Os mapas de diferença de irradiação global para o ano de 2008 são mostrados na figura 4.35. O mês de março apresentou diferenças negativas na maior parte do território brasileiro, e valores positivos apenas em alguns pontos das regiões Sul, Sudeste e Nordeste.

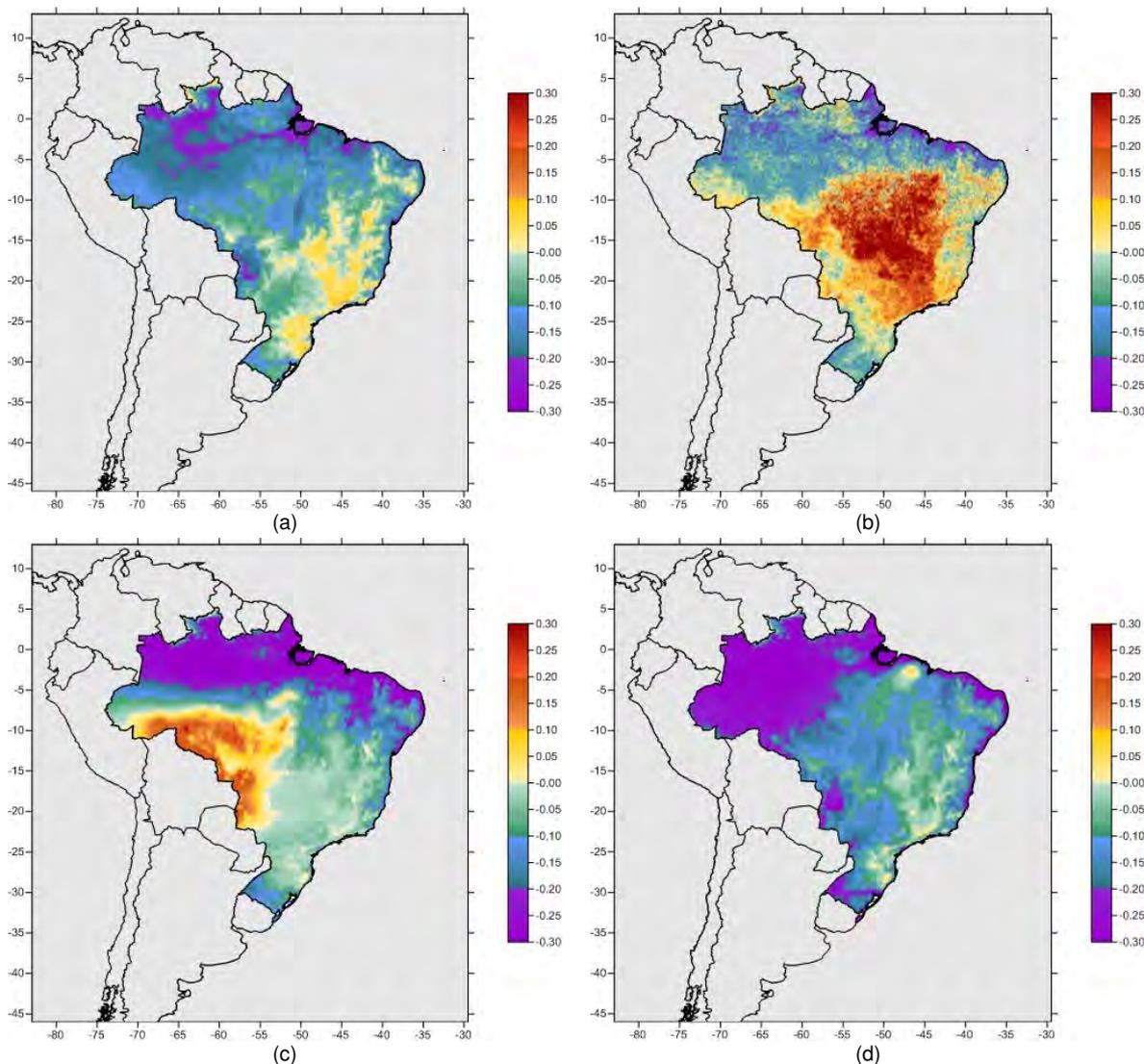


Figura 4.35 – Mapas de diferença de irradiação global (kWh/m²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.

Junho (figura 4.35 b) apresentou diferenças positivas de até 0,35 kWh/m² na região central do país, entre os estados do Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás e Tocantins. Setembro (figura 4.35 c) apresentou valores positivos no oeste das regiões Centro-Oeste e Norte, atingindo até 0,21 kWh/m² em alguns pontos. Já o mapa do mês de dezembro (figura 4.35 d) só apresentou valores positivos (de até 0,09 kWh/m²) em uma pequena região no estado do Maranhão.

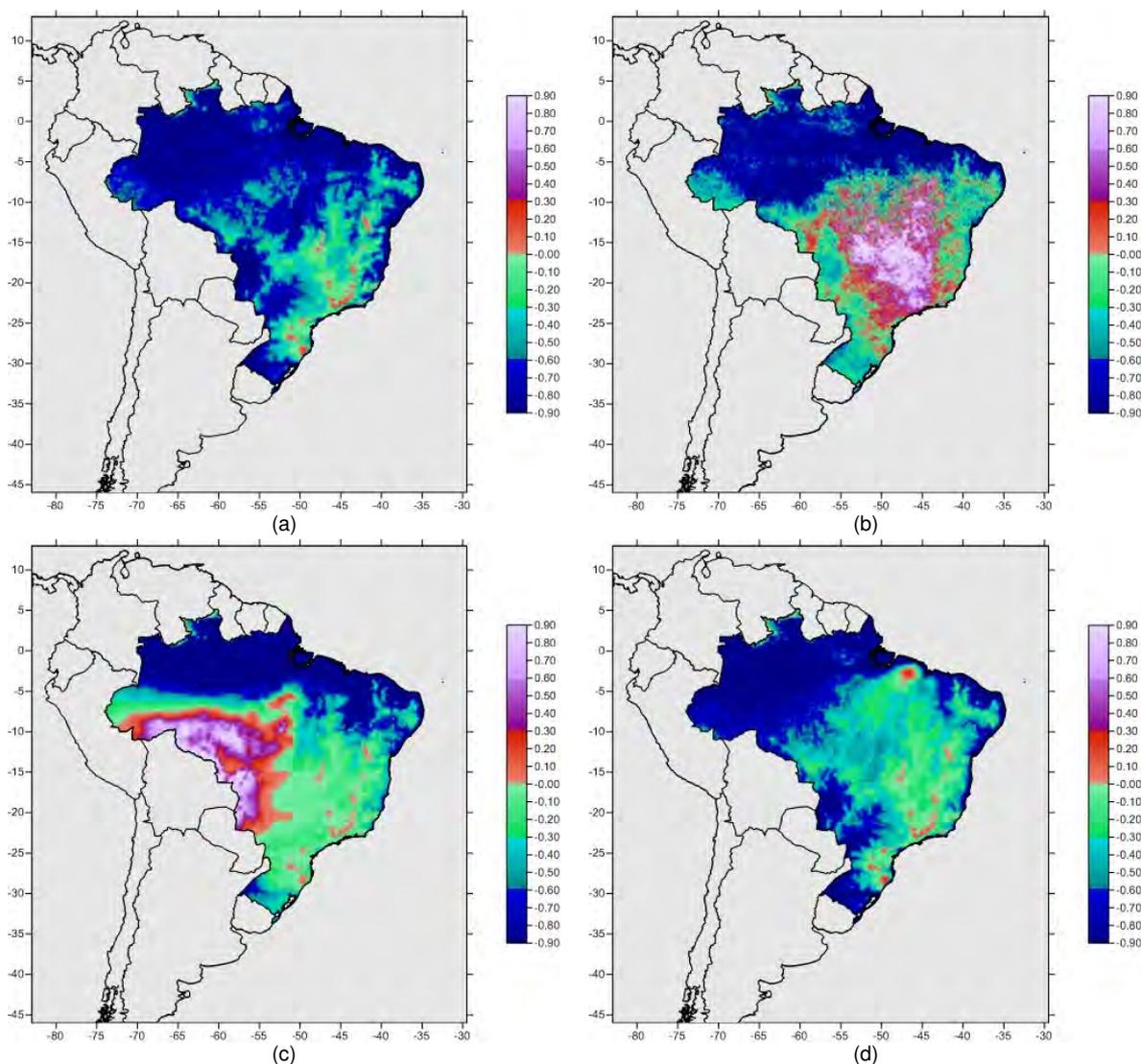


Figura 4.36 – Mapas de diferença de irradiação direta (kWh/m²) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.

A diferença entre a irradiação direta modelada pelas simulações do ano de 2008 é apresentada através dos mapas da figura 4.36. Março apresentou diferenças negativas em quase todo o território brasileiro, com valores positivos apenas em pequenos pontos nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste.

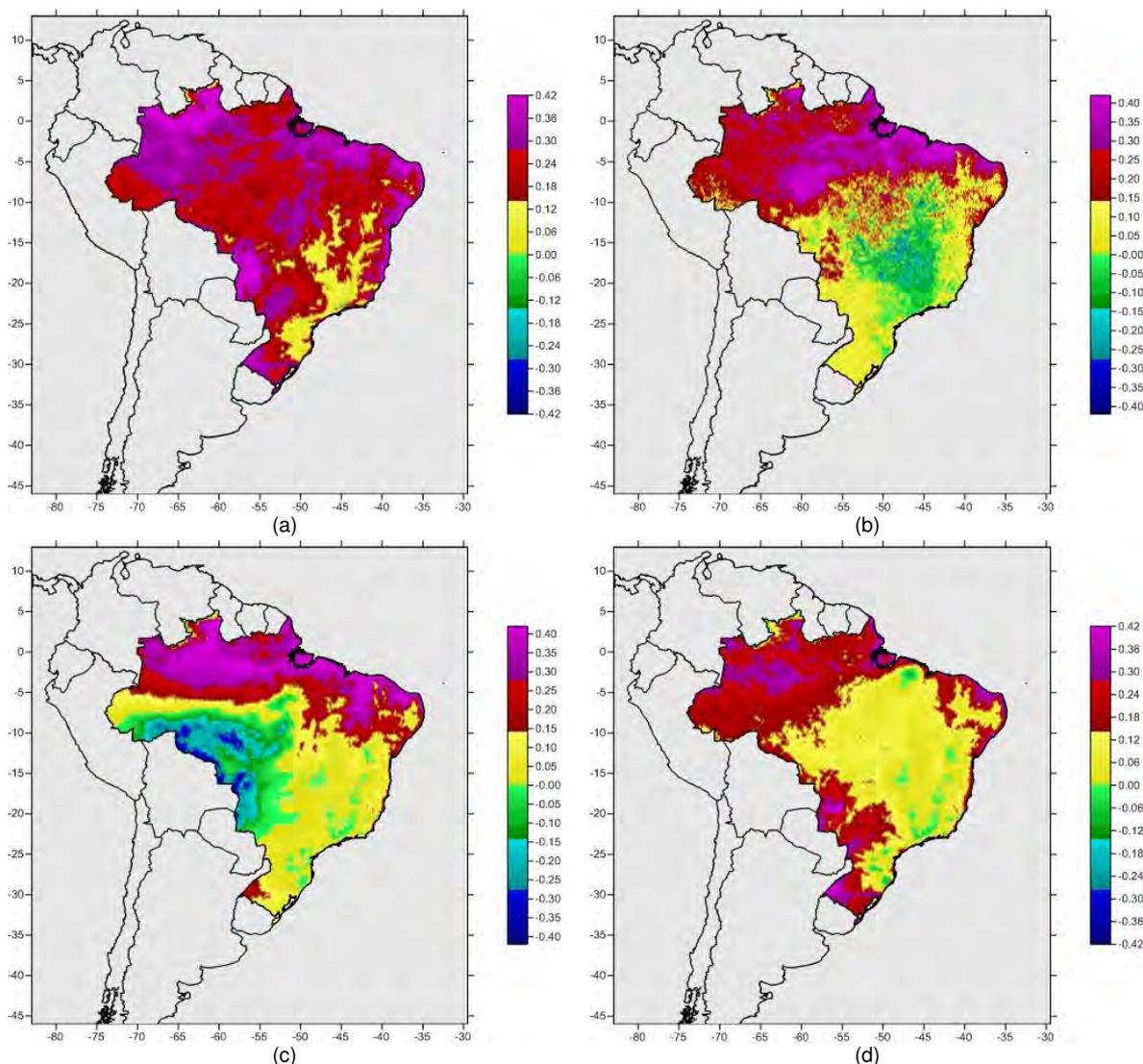


Figura 4.37 – Mapas de diferença de irradiação difusa (kWh/m^2) entre simulações utilizando visibilidade horizontal climatológica e as simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT (550 nm) do modelo CATT-BRAMS, para os meses de março (a), junho (b), setembro (c) e dezembro (d) ano de 2008.

O mês de junho (figura 4.36 b) apresentou valores positivos de até $1,3 \text{ kWh/m}^2$ no centro do país, nos estados de Minas Gerais e Goiás. Setembro (figura 4.36

c) também apresentou regiões com valores positivos (chegando a até 1,4 kWh/m²), nas regiões Centro-Oeste e Norte; já o mapa de dezembro (figura 4.36 d) praticamente só mostrou valor positivo (chegando a 0,26 kWh/m²) no estado do Maranhão.

A figura 4.37 apresenta mapas de diferença de irradiação difusa das simulações realizadas no ano de 2008, que assim como os mapas apresentados nas figuras 4.31 e 4.34, são coerentes com os respectivos mapas de diferença de irradiação global e direta. Março apresentou um mapa bastante similar ao exibido nas figuras 4.31 a e 4.34 a, com valores positivos em todo o território brasileiro. Em junho, valores negativos, que chegam a até 0,28 kWh/m², foram verificados na região central do país, enquanto que em setembro esses valores chegaram a até 0,32 kWh/m² nas regiões Centro-Oeste e Norte. Em dezembro, os valores são positivos em quase todo do território brasileiro, exceto em um núcleo no estado do Maranhão e em algumas regiões espalhadas pelo Sul, Sudeste e Nordeste brasileiro.

4.5.4. Conclusões preliminares das simulações com a visibilidade oriunda da espessura óptica obtida do modelo CATT-BRAMS

A metodologia para a comparação dos resultados obtidos com as simulações que utilizaram a visibilidade horizontal estimada a partir dos dados de espessura óptica dos aerossóis do modelo CATT-BRAMS seguiu a mesma representação do item anterior: os mapas apresentam os valores obtidos nas simulações utilizando a base climatológica de visibilidade subtraídos daqueles obtidos nas novas saídas do modelo BRASIL-SR. Houve, de um modo geral, grande diferença entre os valores de visibilidade horizontal obtidos (apresentados nas figuras 4.26 a 4.28) e os valores da base de visibilidade horizontal climatológica, utilizada originalmente (figura 3.6). Isso fez com que

as diferenças entre as simulações não apresentassem, de maneira tão efetiva, as faixas latitudinais mencionadas no item 4.4.4.

A intenção de se utilizar informações de aerossóis oriundas de modelos – ou mesmo aquelas de observações de satélite – é a de inserir dentro do modelo BRASIL-SR uma caracterização mais próxima daquela ocorrida em um determinado período simulado. A informação de espessura óptica dos aerossóis em 550 nm, obtida das análises do modelo CATT-BRAMS, foi convertida em visibilidade horizontal média mensal e os menores valores estiveram nas regiões onde ocorreram a maior parte dos focos de queima de biomassa nos meses simulados (figuras 4.1 a 4.3). Importante mencionar também que a espessura óptica dos aerossóis do modelo acaba por incluir o transporte atmosférico dos aerossóis, bem como a informação em vários níveis, o que talvez não pudesse ser verificado quando se faz uso da informação de visibilidade horizontal do METAR.

É importante mencionar que em termos de valores absolutos de visibilidade horizontal, pode-se dizer que em grande parte das simulações, houve um aumento da visibilidade horizontal utilizada em relação aos valores climatológicos. Porém, inseriu-se uma informação de localização dos aerossóis mais consistente quando estes fossem resultado da atividade antrópica, o que diminuiria o erro das estimativas de irradiação solar quando em meses de elevados totais de queima.

Dos três anos simulados, os menores valores de visibilidade horizontal foram observados no mês de setembro de 2007. Este mês foi aquele que houve uma maior quantidade de focos de queima detectados, e também por isso aquele que dentre os simulados, houve diminuição da visibilidade horizontal em quase todo o território brasileiro (figura 4.27 b).

Em todos os anos simulados, os meses de junho e setembro apresentaram as maiores diferenças entre as simulações referência, em especial nas regiões Centro-Oeste, Norte e na faixa oeste do Sudeste. As simulações dos meses de

junho também apresentaram diferenças entre as regiões Sul e Sudeste, o que pode ter ocorrido em função de uma melhor caracterização do transporte atmosférico dos aerossóis para esta região (figuras 4.26 b e 4.27 b), devido à atuação mais efetiva da ASAS. As informações de espessura óptica dos aerossóis dos meses de dezembro também permitiram uma melhor identificação da queima de biomassa que ocorre no norte da região Nordeste neste período, o que não foi observado nos dados de METAR utilizados para a atualização da base climatológica de aerossóis.

4.6. Comparação dos resultados com dados de superfície

Para efeito de avaliação das simulações realizadas, as estimativas do modelo BRASIL-SR com diferentes bases de visibilidade horizontal (referência, visibilidade horizontal observada e visibilidade horizontal estimada) foram comparadas com dados medidos em superfície, buscando sempre o ponto de grade mais próximo das estações utilizadas. A disponibilidade dos dados avaliados, bem como eventuais problemas nas imagens de satélite utilizadas nas integrações do modelo foram os fatores limitantes das comparações.

4.6.1. Avaliação das simulações de 2006

4.6.1.1. Março

A figura 4.38 apresenta os gráficos de correlação entre os dados de irradiação global diária modelada nas três simulações e a irradiação global diária observada em sete estações no território brasileiro, sendo a maior correlação

observada na estação de Alta Floresta (da ordem de 0,95) e a menor na estação de Petrolina (da ordem de 0,36).

Os gráficos com os valores diários de irradiação global estimada pelas três simulações, além dos valores diários medidos no mês de março de 2006 são apresentados na figura 4.39. Verificou-se a capacidade do modelo BRASIL-SR em representar não só os valores diários, além do comportamento da variável durante o mês. A exceção é o gráfico da estação de Petrolina, onde todas as simulações do modelo apresentaram baixa correlação com os dados medidos.

Para avaliação da irradiação direta estimada, estavam disponíveis dados das estações de Brasília e Florianópolis, sendo os gráficos de correlação e de valores diários apresentados na figura 4.40. Verificou-se que apesar da alta correlação entre os dados estimados e medidos, o modelo tende a superestimar os valores em todas as simulações.

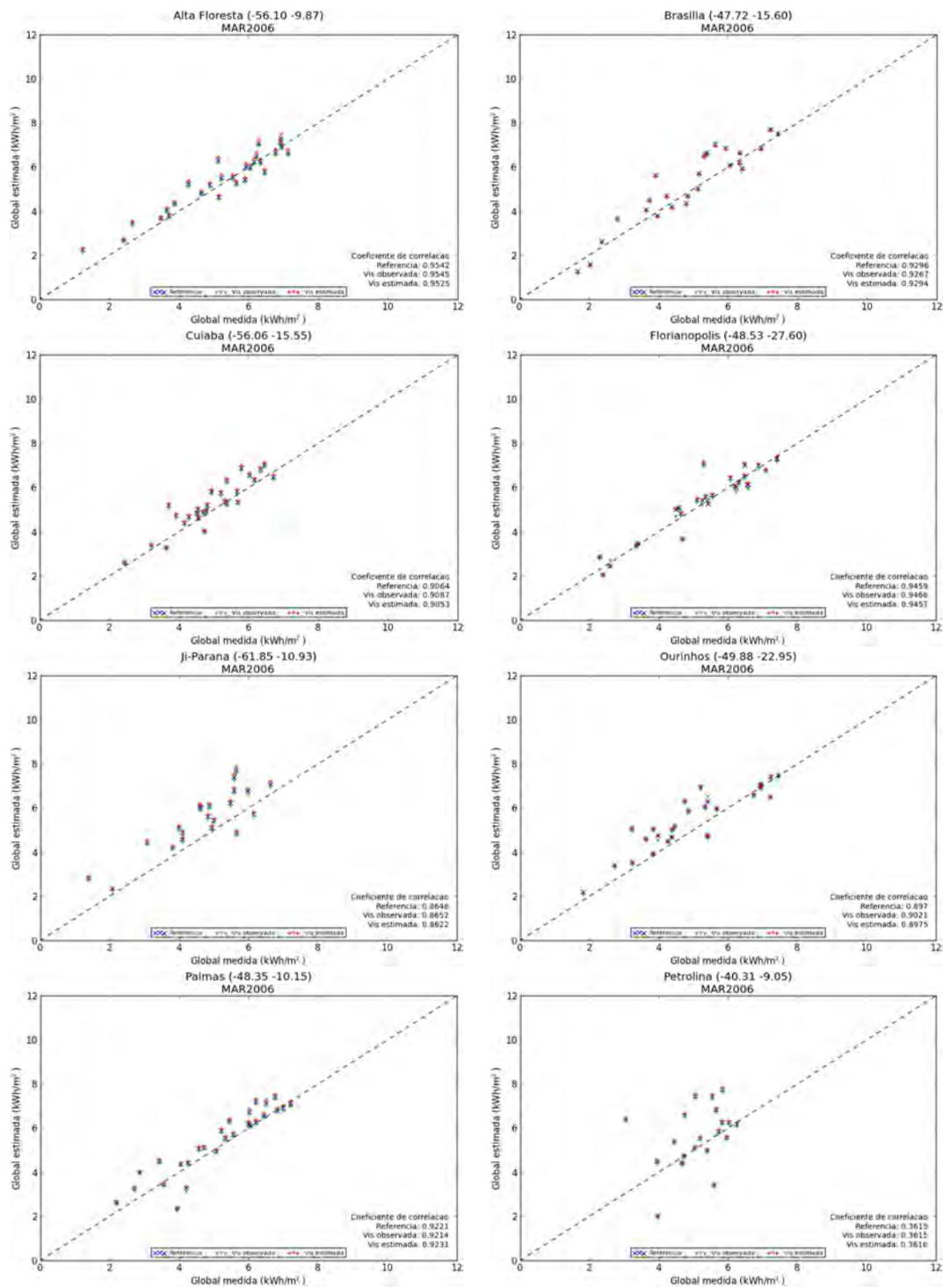


Figura 4.38 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e Petrolina.

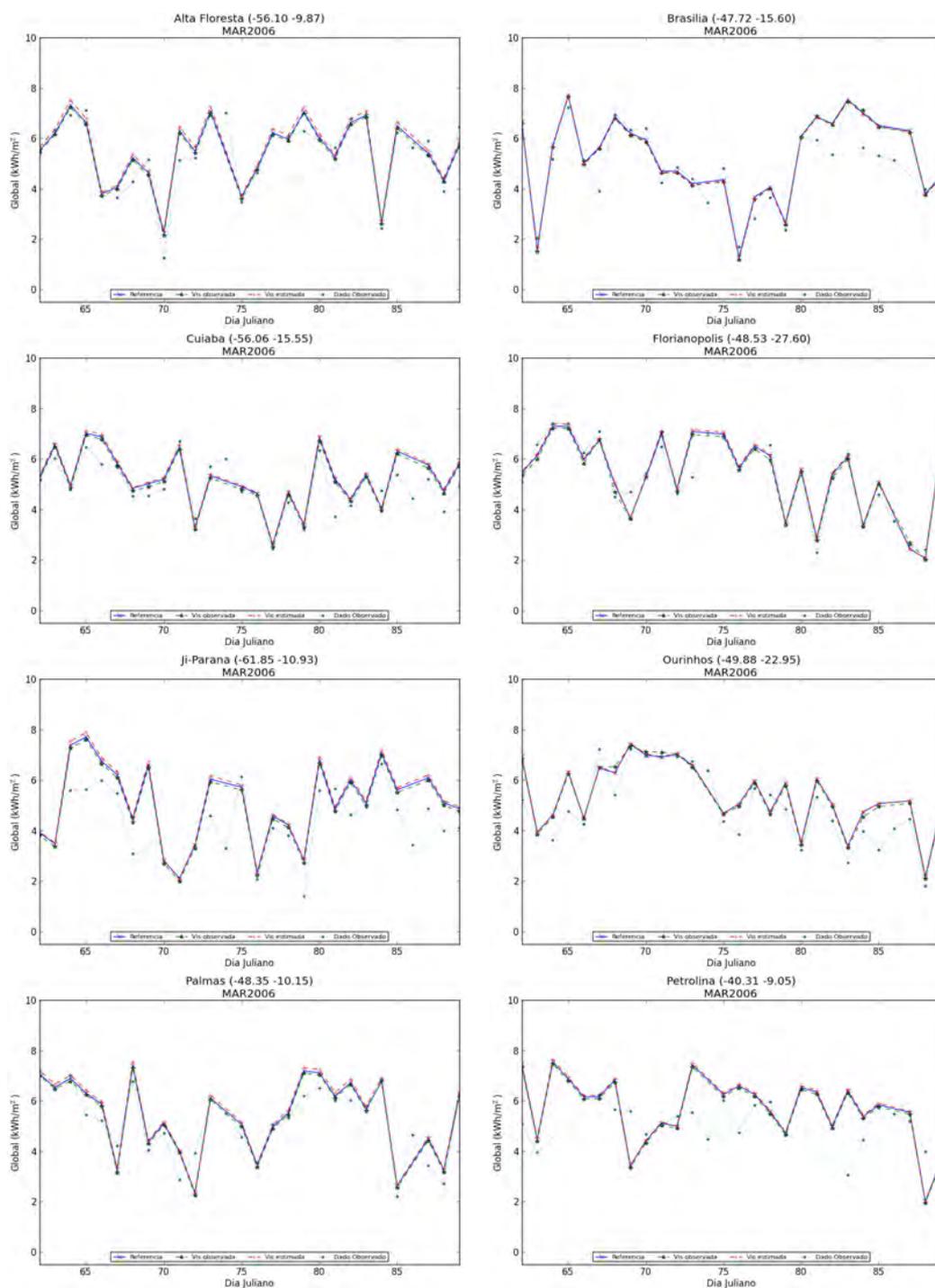


Figura 4.39 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e Petrolina.

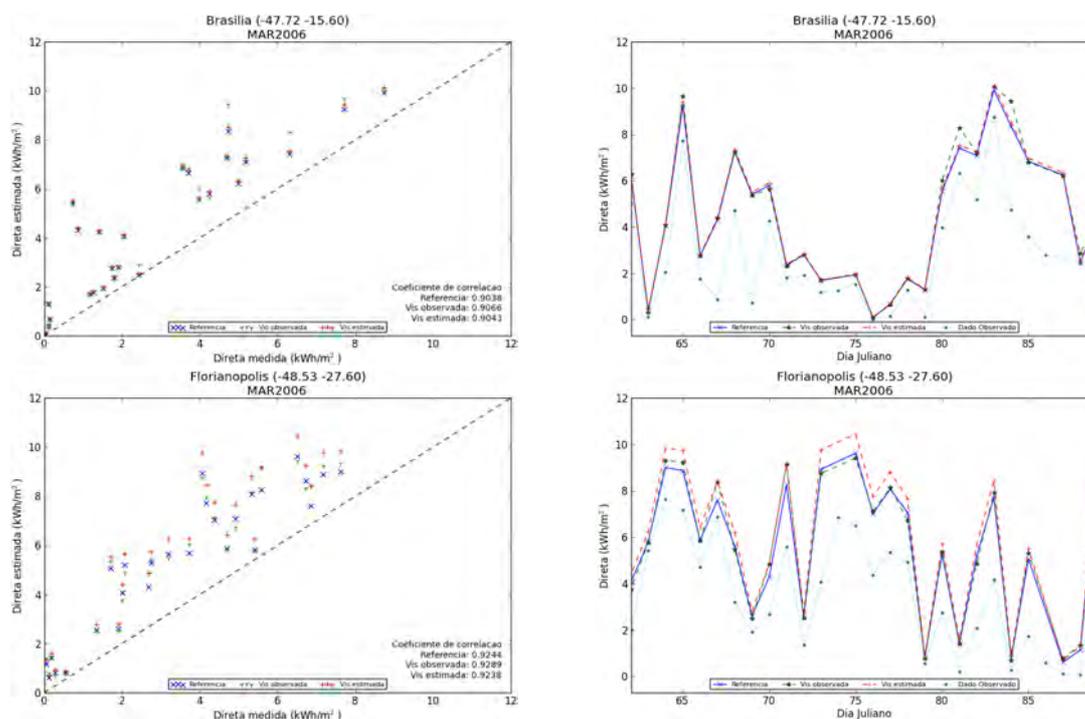


Figura 4.40 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de março de 2006, nas estações de Brasília e Florianópolis.

Na figura 4.41 são apresentados os gráficos de correlação entre os dados de irradiação difusa diária modelada nas três simulações e a irradiação difusa diária observada, em cinco das estações anteriormente apresentadas (Alta Floresta, Florianópolis e Ji-Paraná não dispõem destes dados). Os valores diários de irradiação difusa estimada pelas três simulações e os medidos no mesmo período são apresentados na figura 4.42.

A correlação entre os valores modelados e o valor medido é menor que a observada na irradiação global e direta, sendo Cuiabá e Petrolina aquelas onde o modelo teve pior comportamento. As maiores correlações (da ordem de 0,7 e 0,8) foram verificadas nas estações de Ourinhos e Palmas, inclusive com discreta melhora nos coeficientes de correlação das simulações com a visibilidade horizontal estimada pela AOT.

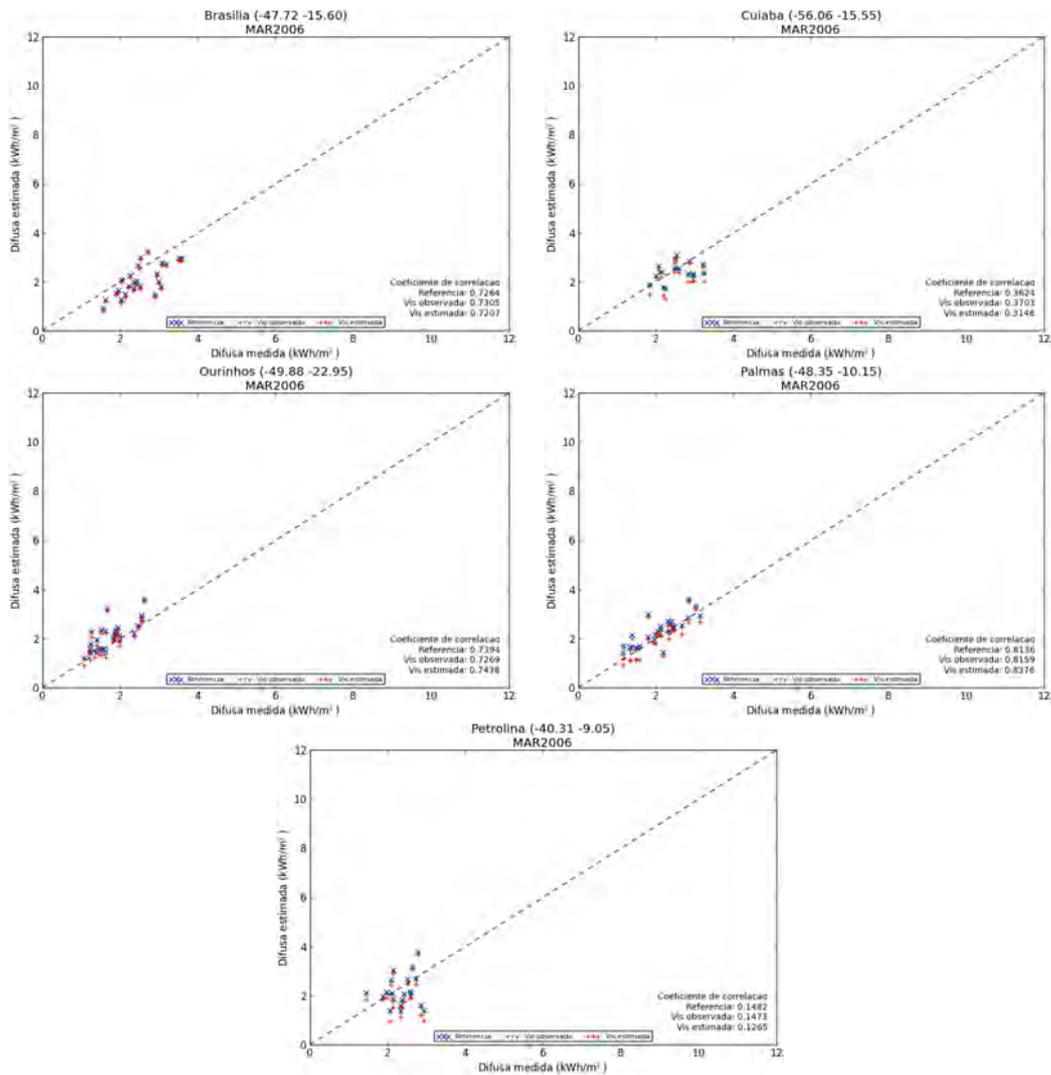


Figura 4.41 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos, Palmas e Petrolina.

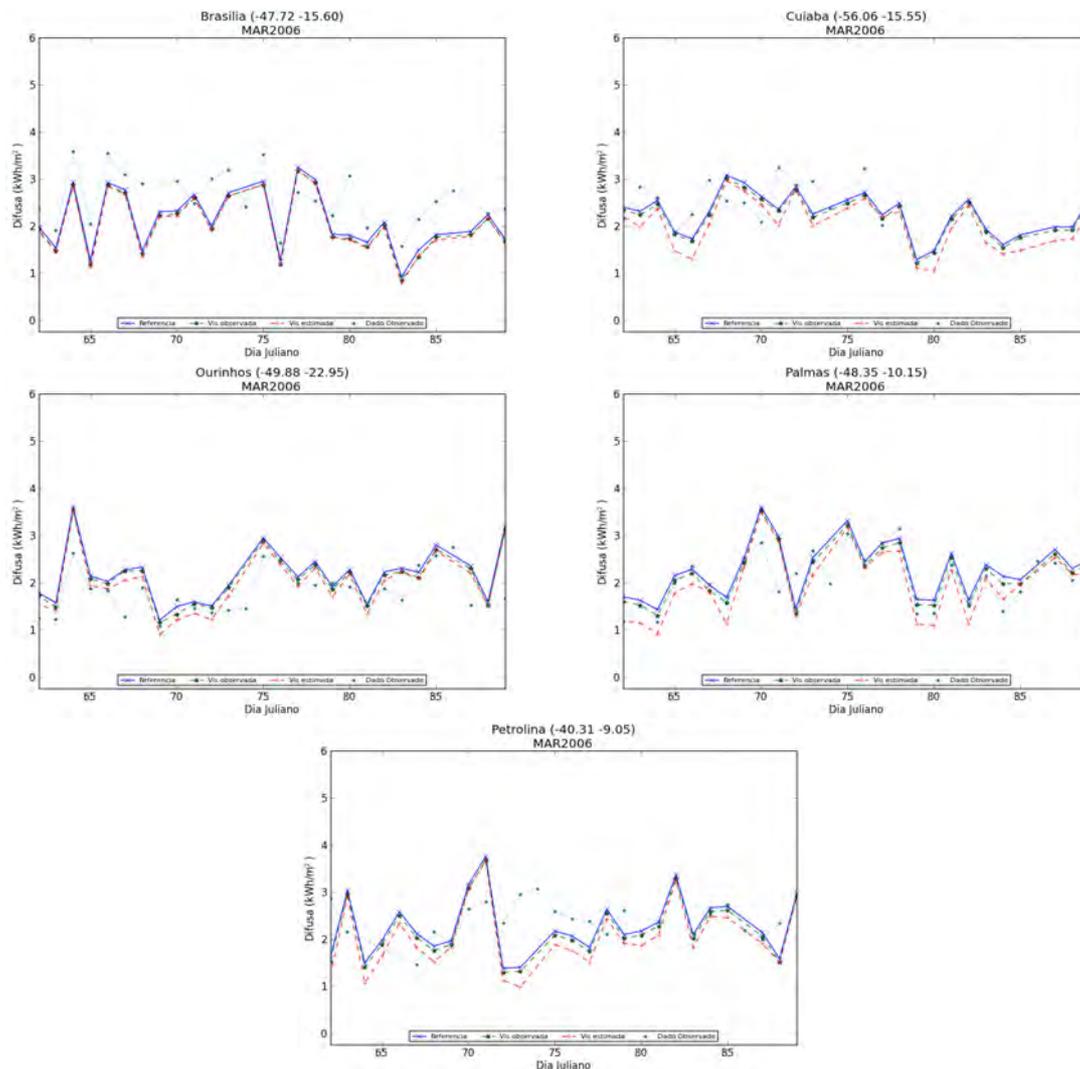


Figura 4.42 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos, Palmas e Petrolina.

4.6.1.2. Junho

A figura 4.43 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de junho de 2006, onde os melhores valores foram verificados nas estações de Brasília, Florianópolis e Ourinhos (da ordem de 0,94, 0,98 e 0,96, respectivamente). As menores

correlações foram observadas nas estações de Palmas e Ji-Paraná, com valores da ordem de 0,30 e 0,12. Os gráficos de valores diários de irradiação global estimada pelas três simulações e os medidos no mesmo período são apresentados na figura 4.44, onde podemos destacar uma tendência do modelo em subestimar os valores nas estações de Alta Floresta, Ji-Paraná e Palmas.

Os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação direta estimada e irradiação direta medida, além dos valores diários no mês de junho são apresentados na figura 4.45. A correlação entre os dados estimados e os dados medidos esteve acima de 0,90 nas três estações, e indicam que o modelo, mesmo bem comportado, tende a superestimar os valores de irradiação direta.

A figura 4.46 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação difusa estimada e irradiação global medida no mês de junho de 2006. As maiores correlações foram observadas nas estações de Ourinhos e São Martinho da Serra, na ordem de 0,80 e 0,75, respectivamente.

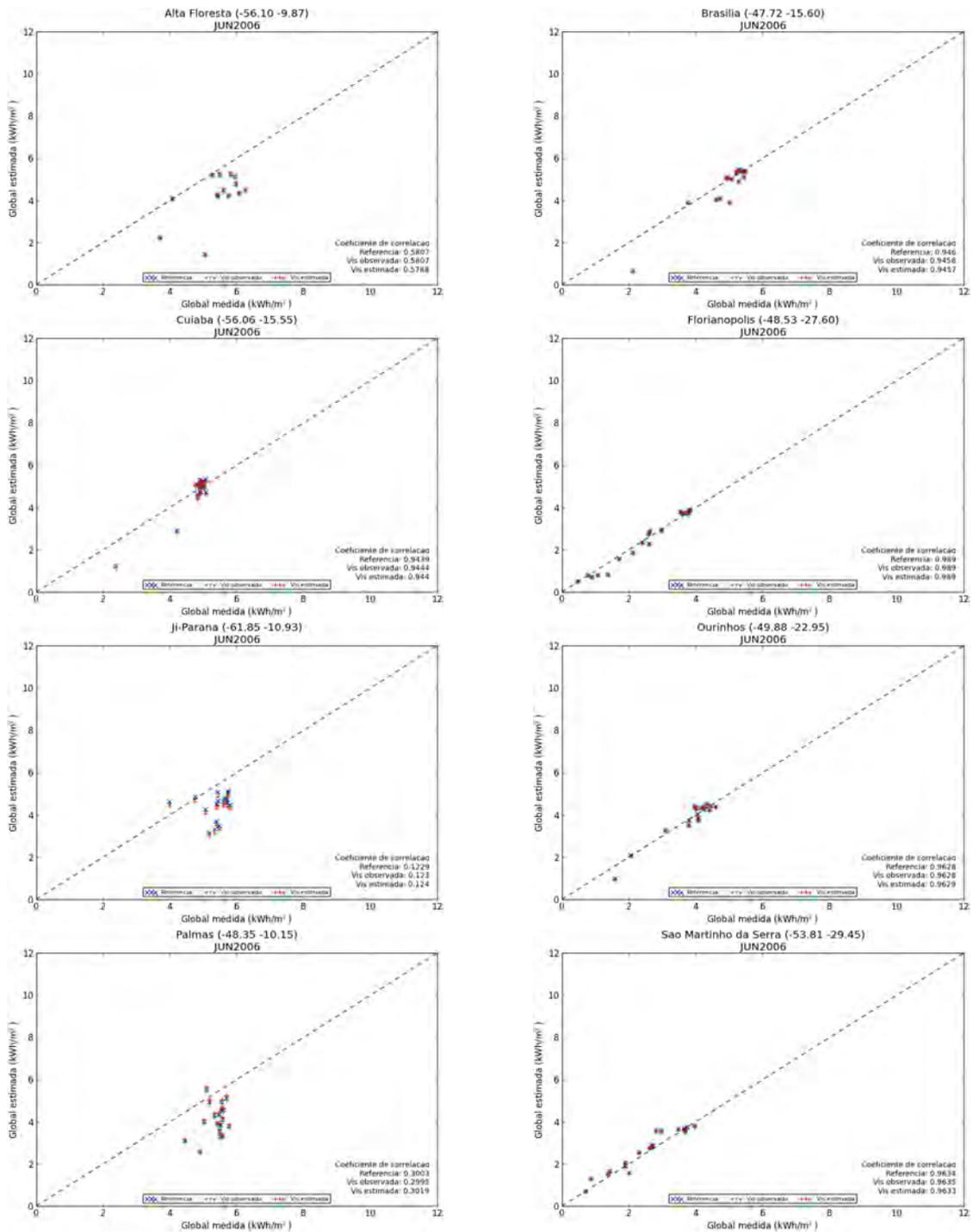


Figura 4.43 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) em junho de 2006, em Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e São Martinho da Serra.

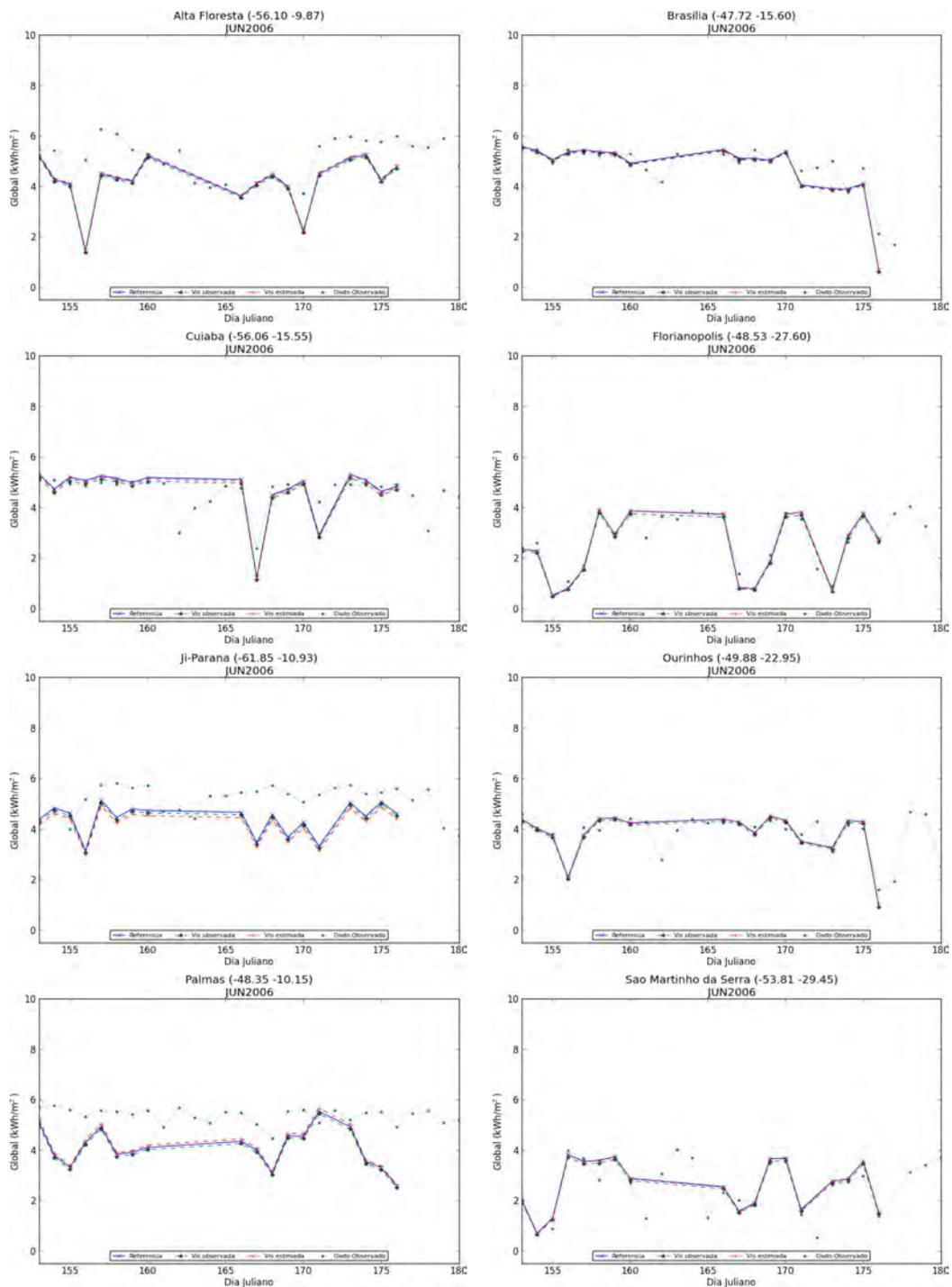


Figura 4.44 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e São Martinho da Serra.

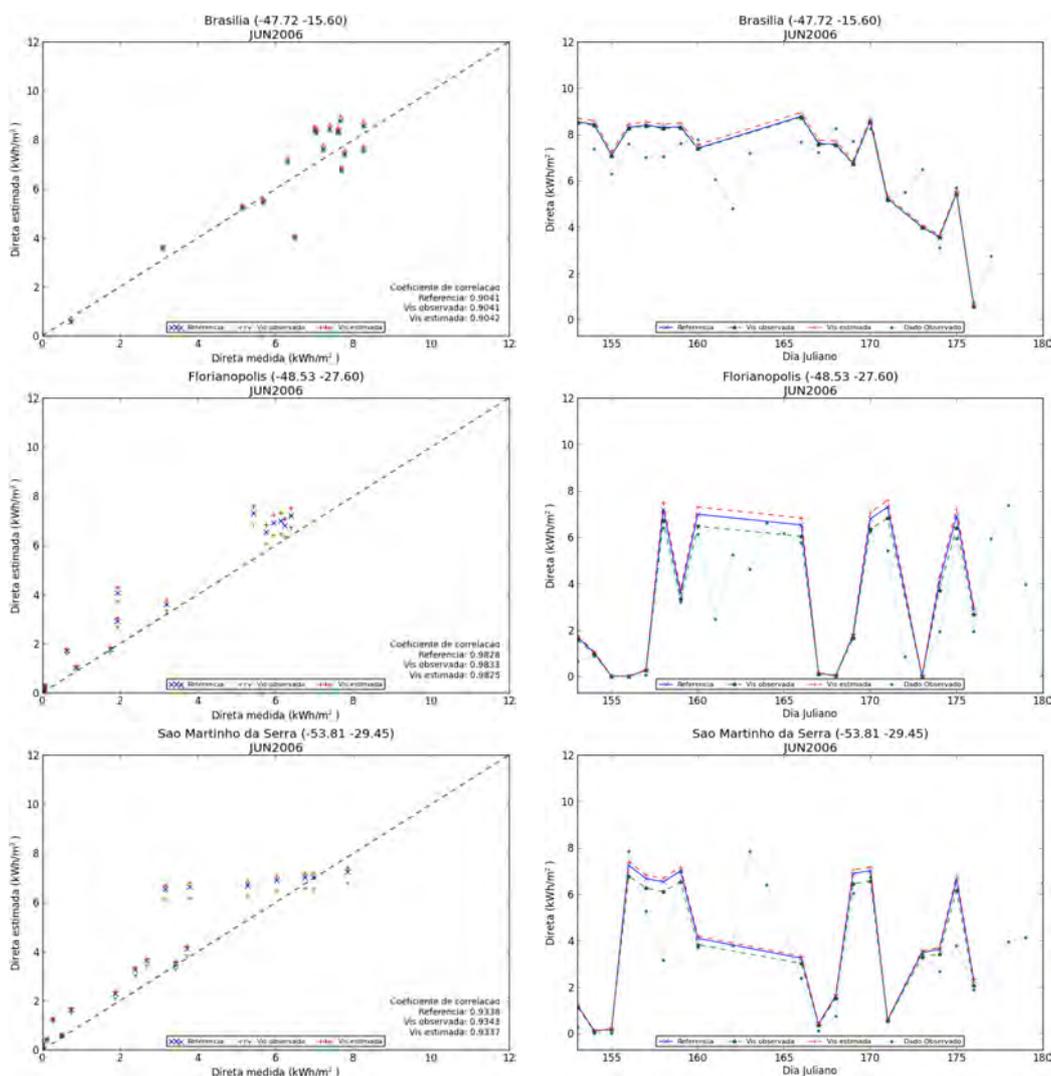


Figura 4.45 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2006, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.

Os valores diários de irradiação difusa estimada e os totais medidos neste mês de junho são apresentados na figura 4.47 e indicam que mesmo que de maneira bastante sutil, o modelo tende a superestimar os valores em Cuiabá.

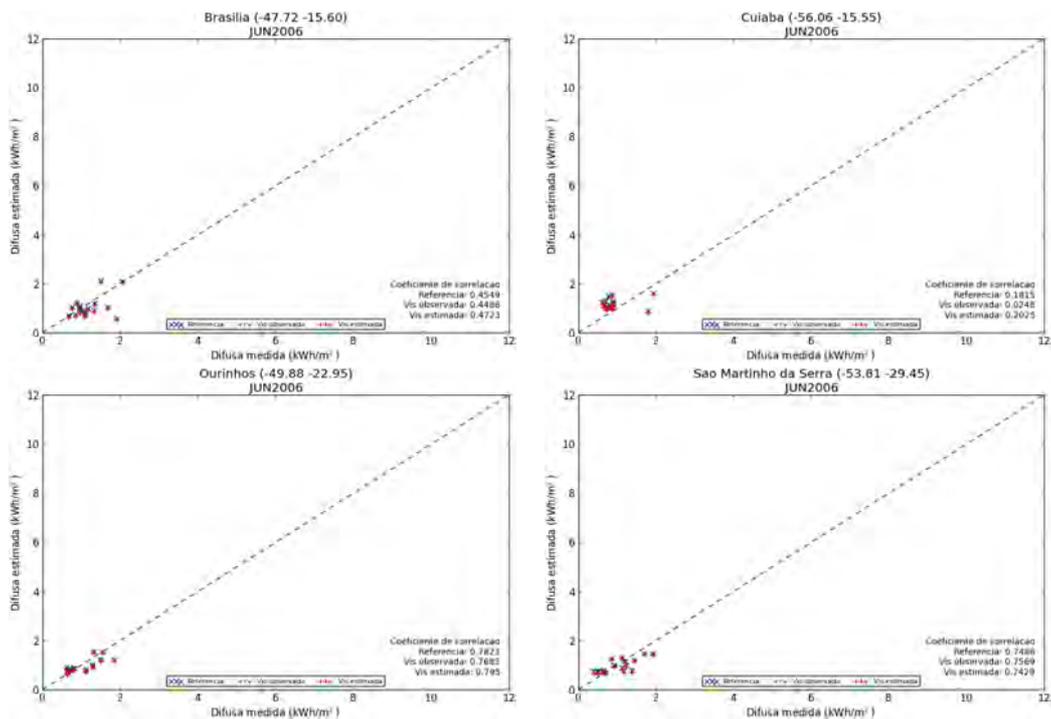


Figura 4.46 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos e São Martinho da Serra.

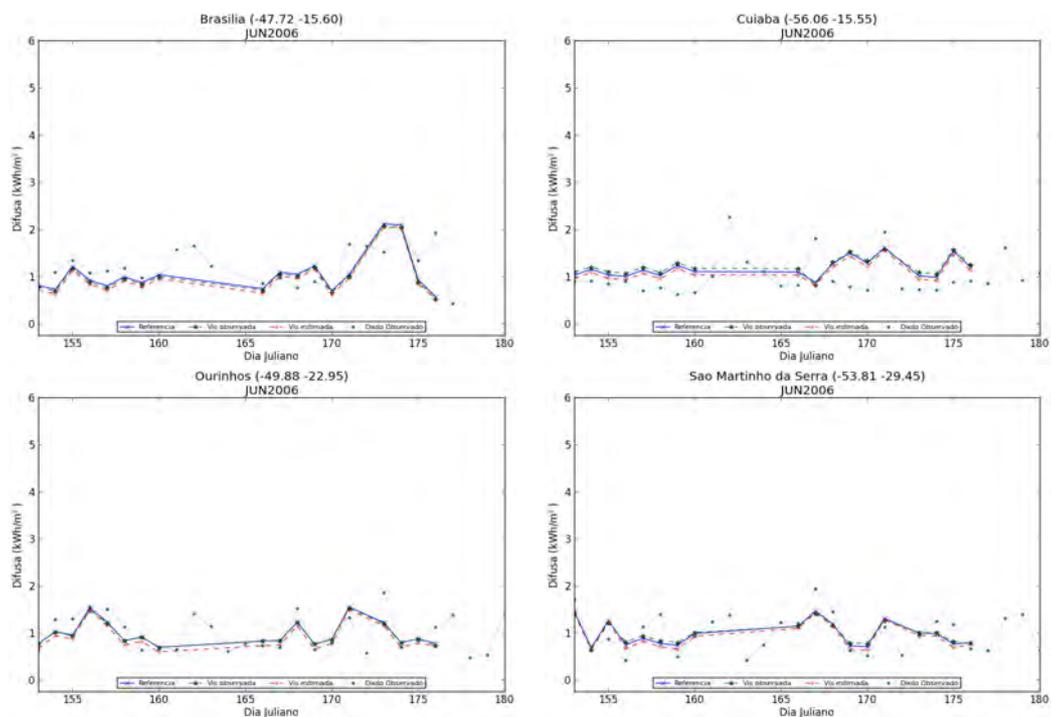


Figura 4.47 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2006, nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos e São Martinho da Serra.

4.6.1.3. Setembro

A figura 4.48 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de setembro de 2006. Neste mês, verificou-se boa correlação em todas as estações analisadas (acima de 0,90), sendo Brasília e São Martinho da Serra as maiores correlações observadas. Na figura 4.49 é possível observar os valores diários de irradiação global estimada e medida para o mês em questão, onde é verificada uma tendência de superestimativa do modelo nas estações de Alta Floresta, Cuiabá e Ji-Paraná.

A correlação entre dos dados de irradiação direta estimada e irradiação direta medida nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra pode ser observada na figura 4.50, onde valores de correlação acima de 0,91 foram verificados, mas com uma clara tendência de superestimativa do modelo.

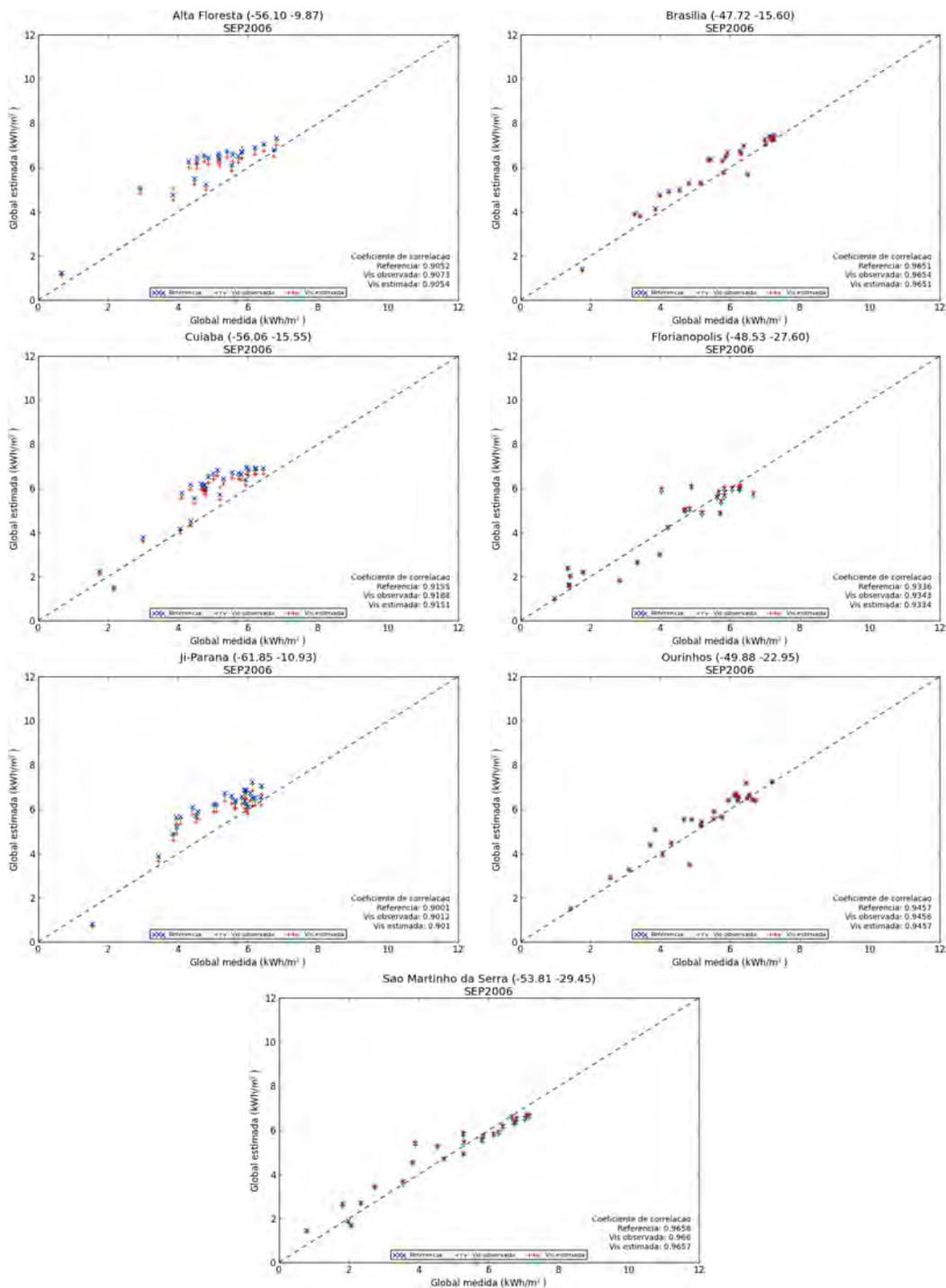


Figura 4.48 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos e São Martinho da Serra.

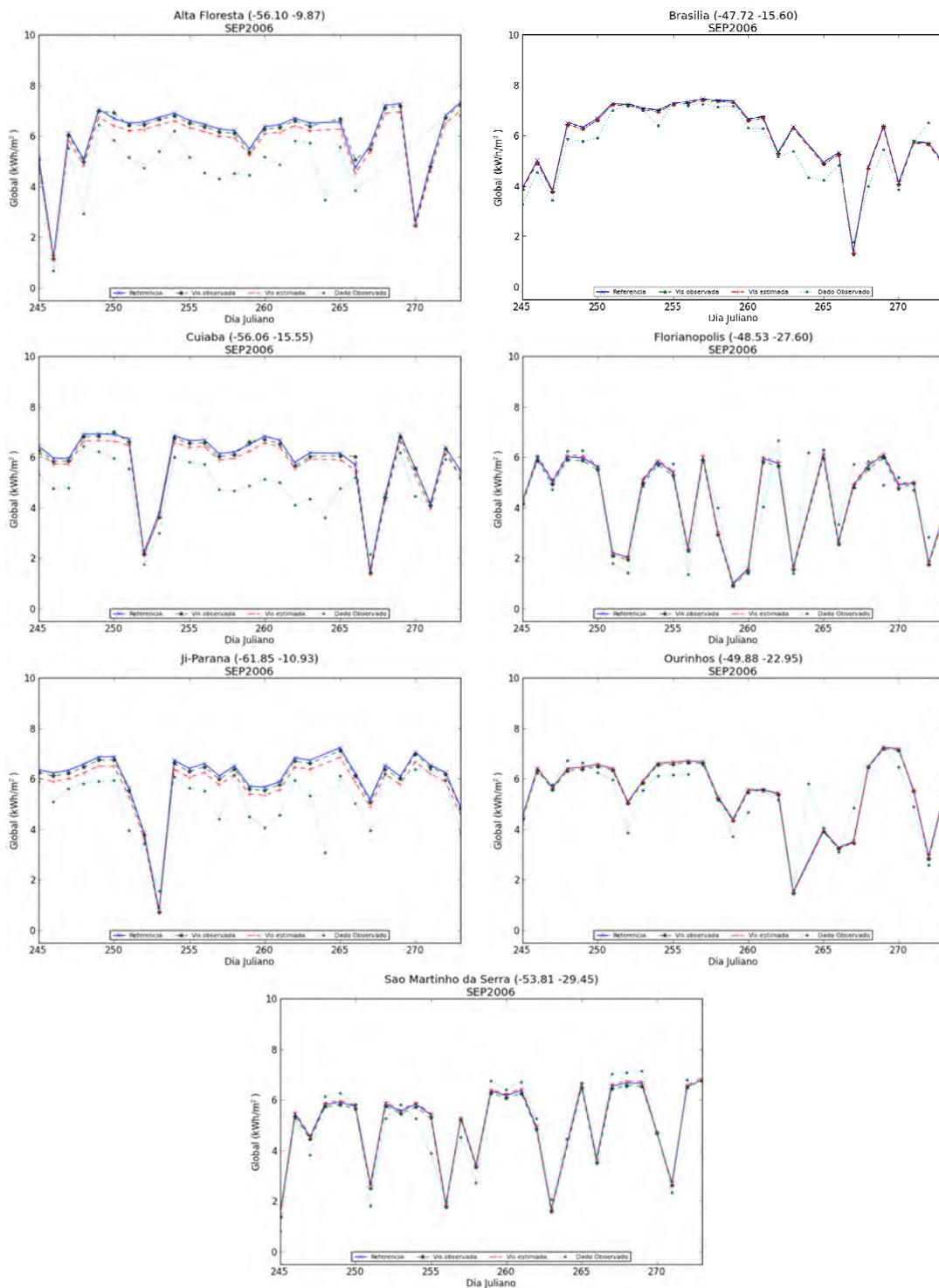


Figura 4.49 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos e São Martinho da Serra.

Já as correlações entre os dados de irradiação difusa estimados e os dados medidos nas estações de Brasília, Ourinhos e São Martinho da Serra, apresentados na figura 4.51, foram da ordem de 0,86, 0,89 e 0,67, respectivamente. O modelo tende a subestimar os valores medidos.

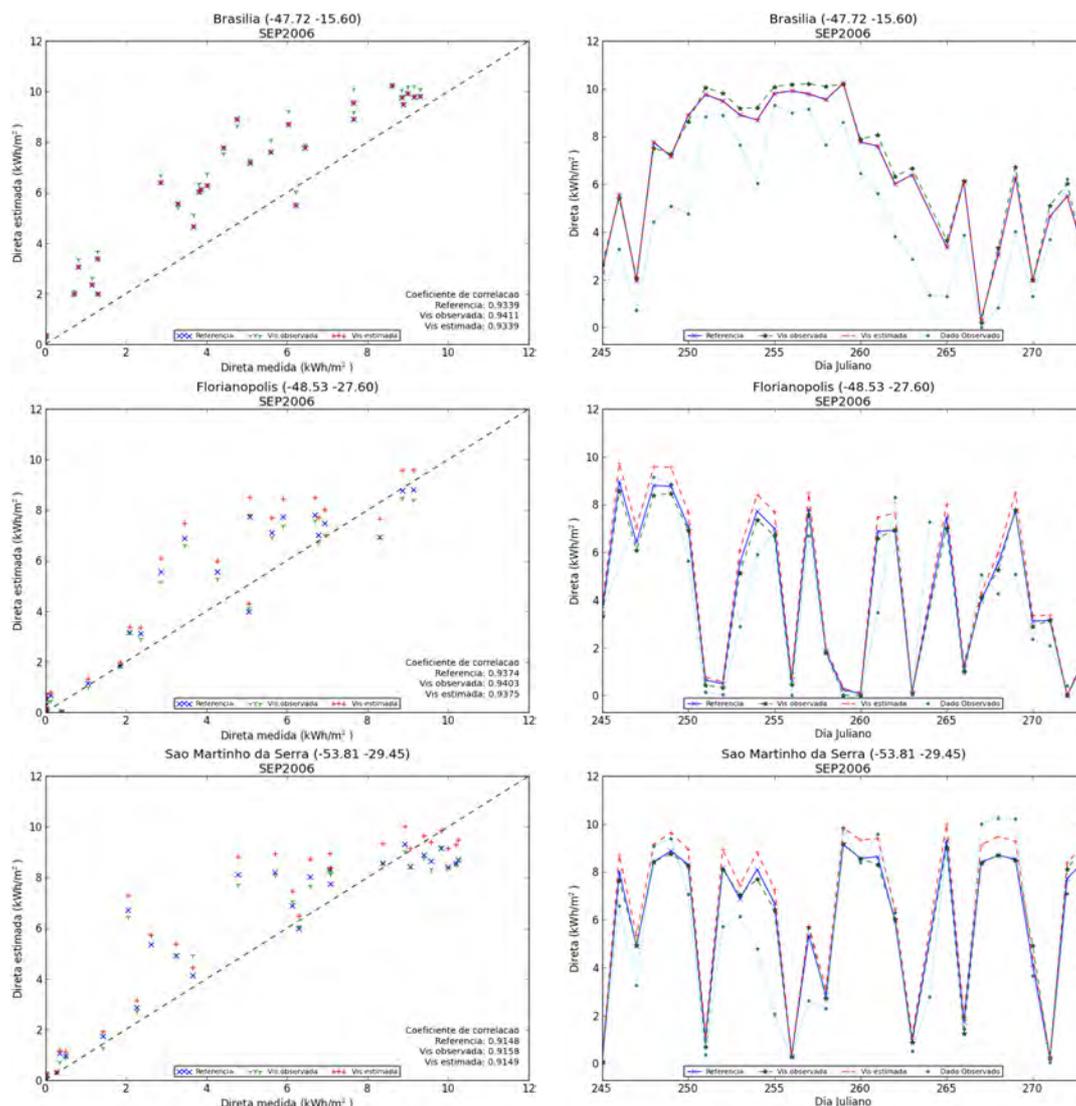


Figura 4.50 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.

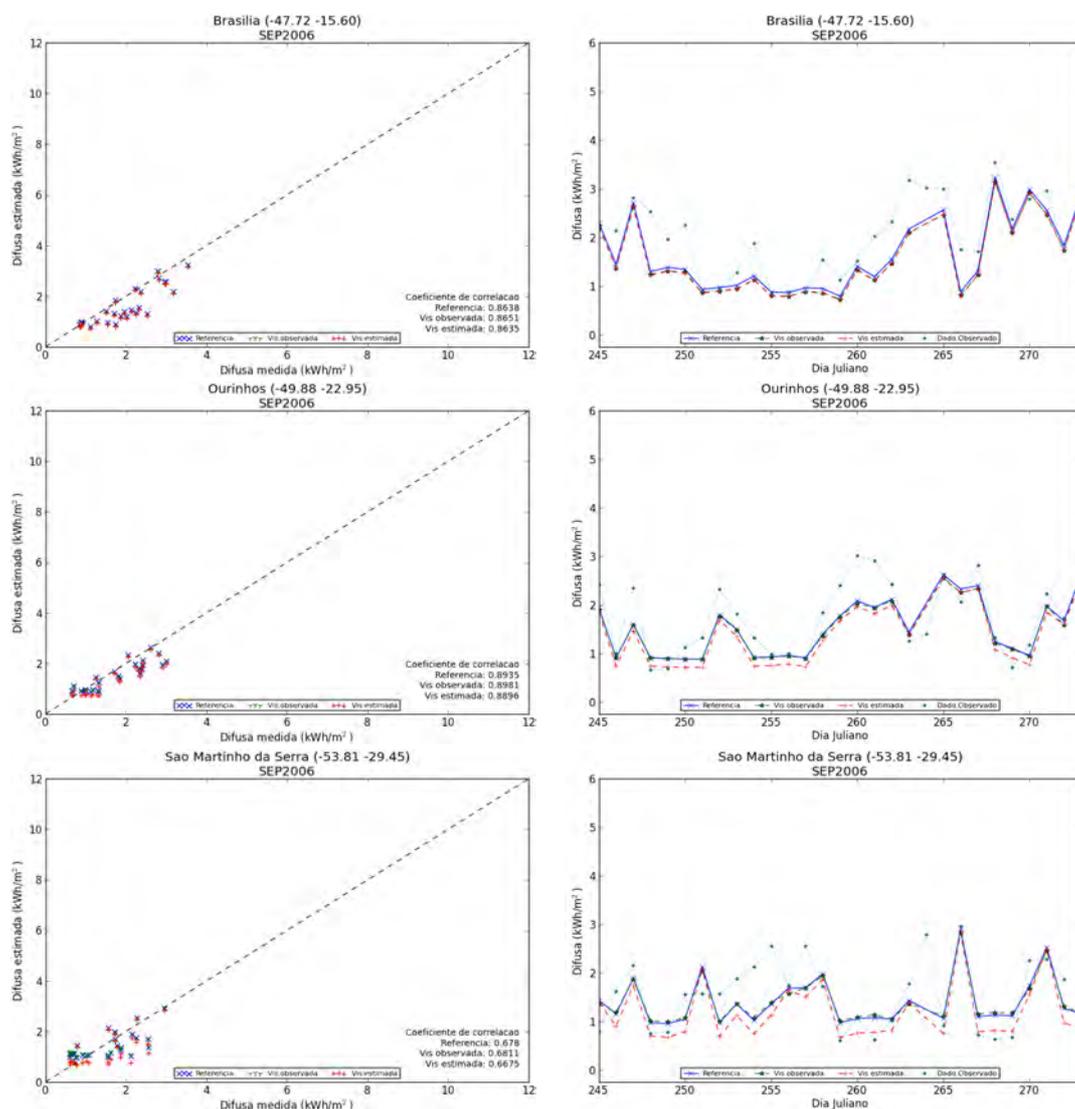


Figura 4.51 – Correlação e valores diários de irradiação difusa estimada e irradiação difusa medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2006, nas estações de Brasília, Ourinhos e São Martinho da Serra.

4.6.1.4. Dezembro

A figura 4.52 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de dezembro de 2006, onde mais uma vez foi verificada uma boa correlação em todas as estações analisadas (acima de 0,91). Uma análise visual dos valores diários

apresentados na figura 4.53 permite afirmar que as maiores superestimativas do modelo neste período foram observadas na estação de Ji-Paraná. A correlação e os valores diários das estimativas e dos dados medidos de irradiação direta nas estações de Brasília e São Martinho da Serra são apresentados na figura 4.54.

Verificou-se que as correlações foram da ordem de 0,95, com uma clara tendência do modelo em superestimar os valores de irradiação direta nas duas estações neste período.

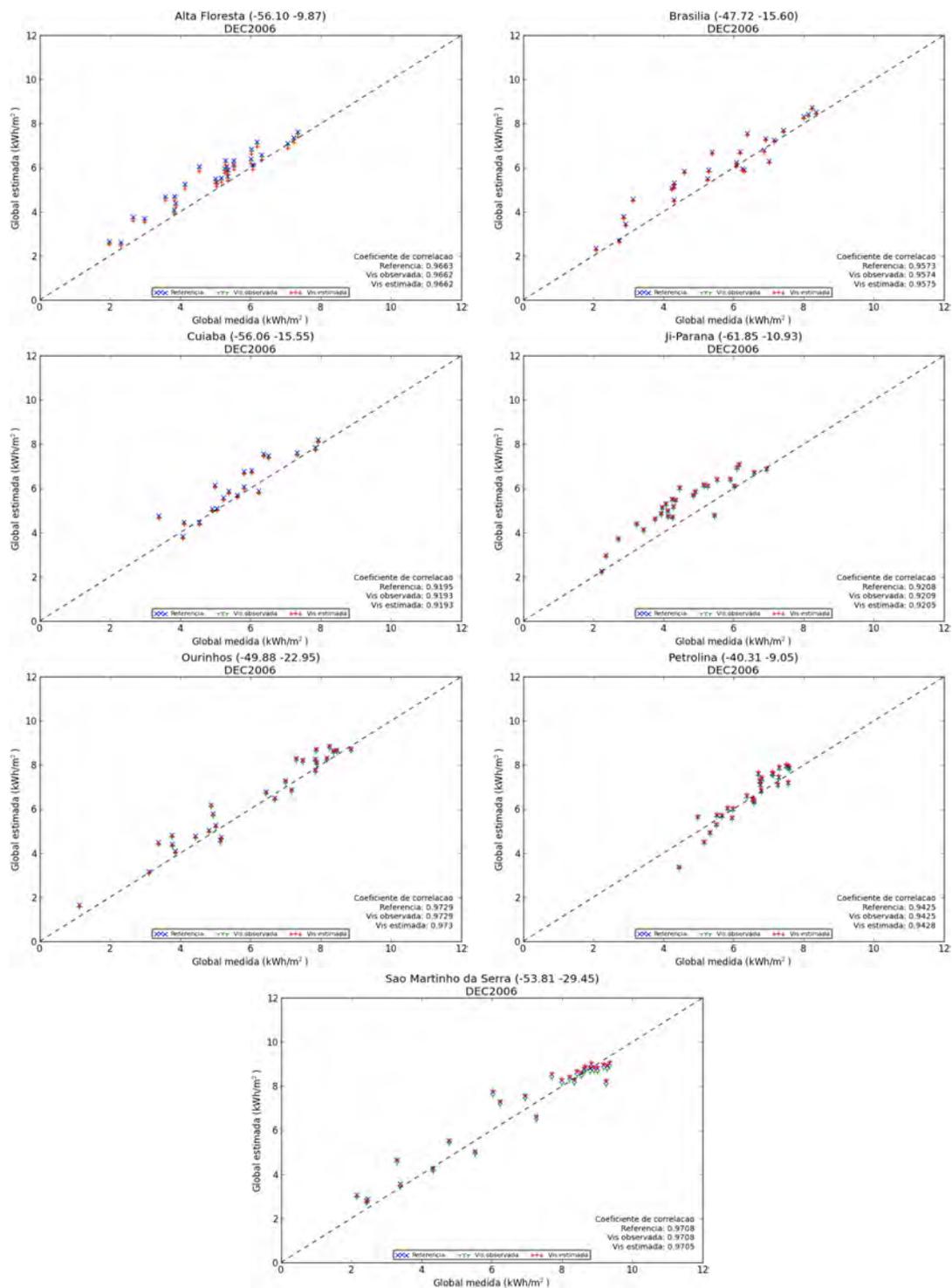


Figura 4.52 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

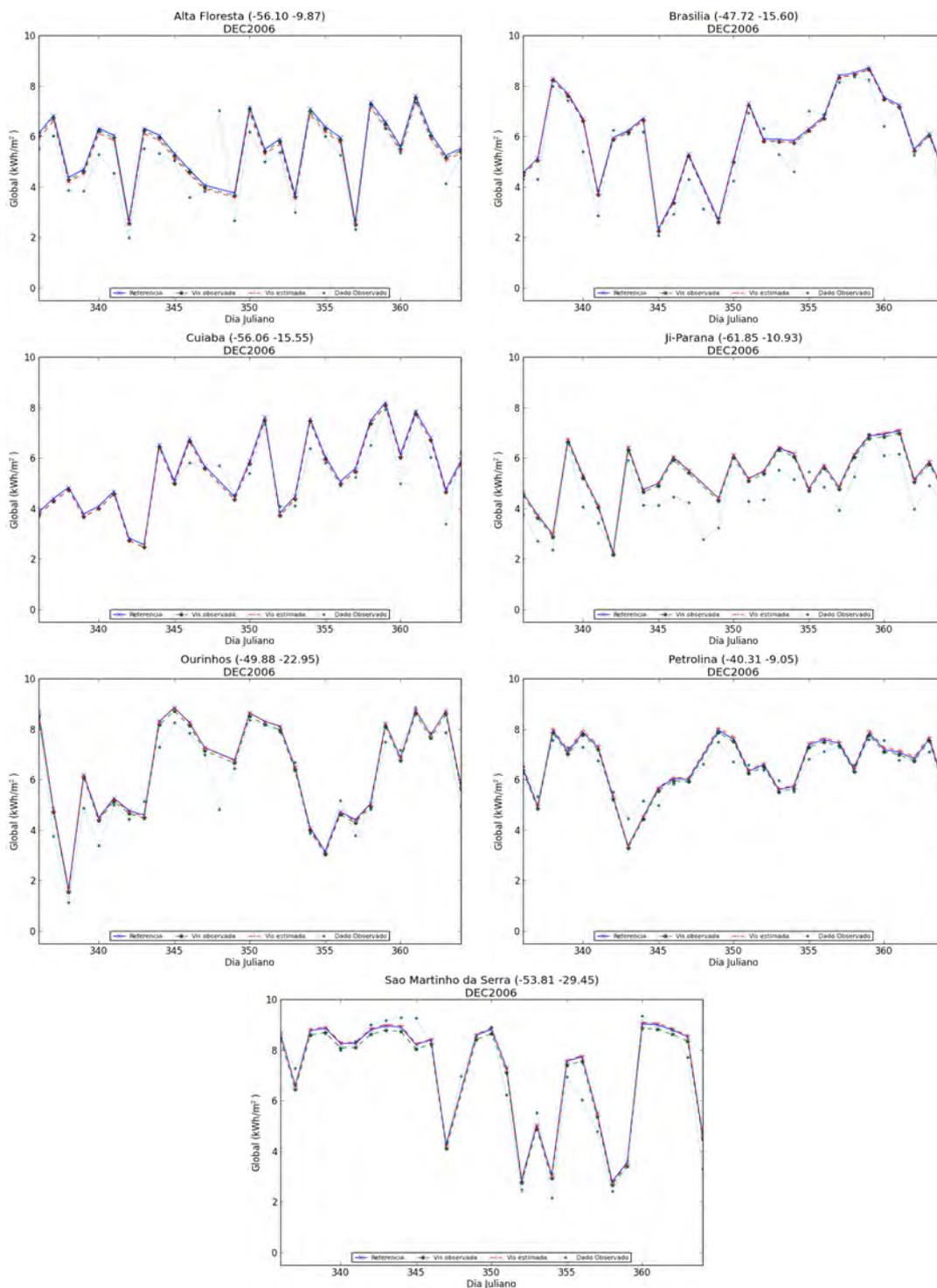


Figura 4.53 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

Já os valores de correlação entre os dados de irradiação difusa estimados e medidos e os valores diários, são apresentados nas figuras 4.55 e 4.56. A maior correlação verificada foi na estação de São Martinho da Serra (da ordem de 0,9), enquanto que a menor correlação foi verificada em Petrolina, atingindo 0,68. Os gráficos com os valores diários de estimados e medidos para o período são apresentados na figura 4.56.

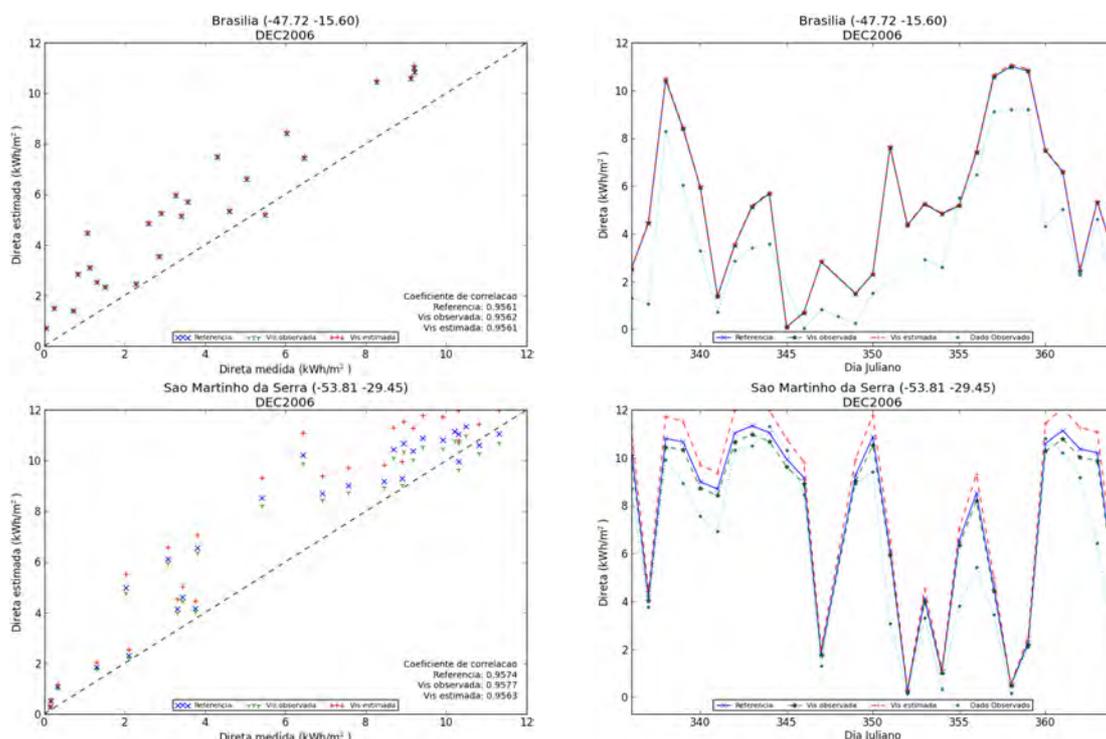


Figura 4.54 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Brasília e São Martinho da Serra.

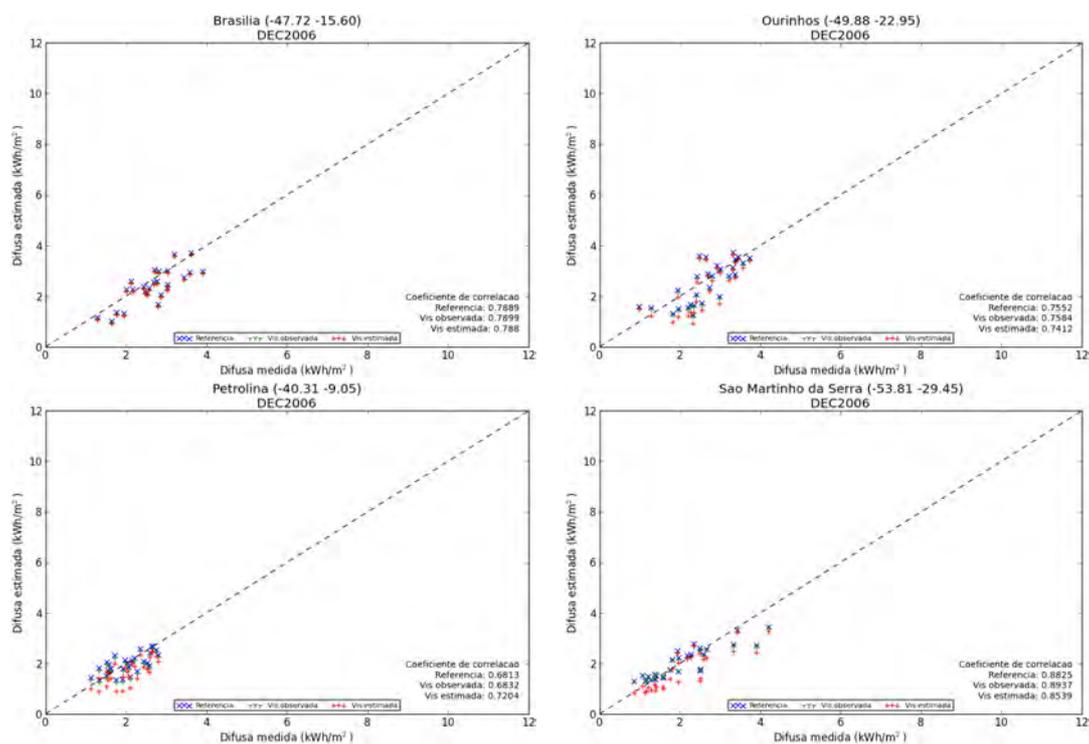


Figura 4.55 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Brasília, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

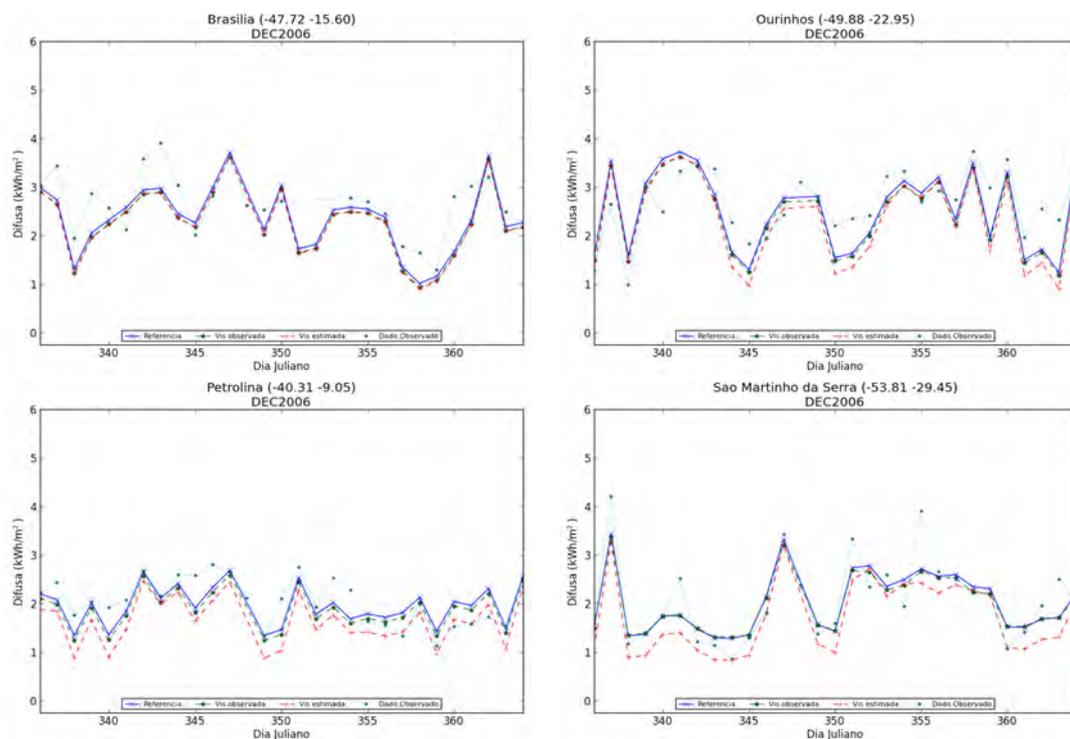


Figura 4.56 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2006, nas estações de Brasília, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

4.6.1.5. Discussão

As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores de viés e da raiz do erro quadrático médio (RMSE) para as estimativas de irradiação global, direta e difusa das três simulações realizadas neste trabalho, que utilizaram diferentes bases de visibilidade horizontal – a base climatológica, definida como sendo a simulação referência; a base de visibilidade horizontal atualizada, e a base de visibilidade horizontal estimada através dos valores de espessura óptica dos aerossóis, obtida do modelo CATT-BRAMS. Para avaliação das simulações de irradiação global para este período, foram utilizados dados de nove estações espalhadas ao redor do território brasileiro e os valores podem ser observados na tabela 4.1.

Nas avaliações realizadas no mês de março, foram observadas melhorias em todas as oito estações analisadas. Algumas destas foram discretas, mas é importante levar em consideração que este é o mês onde climatologicamente se espera uma menor quantidade de aerossóis na atmosfera, e conseqüentemente maiores valores de visibilidade horizontal.

É interessante mencionar que em todas as oito estações analisadas (Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Florianópolis, Ji-Paraná, Ourinhos, Palmas e Petrolina), a diminuição do viés e do RMSE foi verificada, em sua maioria, nas simulações com a visibilidade horizontal observada. As situações onde a visibilidade horizontal estimada teve um melhor desempenho ocorreram, basicamente, em meses ou regiões onde foram observados maiores valores de espessura óptica.

Tabela 4.1 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação global das simulações realizadas para o ano de 2006.

Irradiação Global		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Alta Floresta	Março	0,171	0,091	0,294	0,496	0,472	0,549
	Junho	-1,185	-1,257	-1,147	1,473	1,530	1,455
	Setembro	1,104	1,045	0,827	1,233	1,178	0,992
	Dezembro	0,596	0,499	0,402	0,699	0,618	0,546
Brasília	Março	0,356	0,305	0,307	0,719	0,713	0,699
	Junho	-0,215	-0,270	-0,242	0,512	0,537	0,529
	Setembro	0,347	0,290	0,273	0,515	0,477	0,468
	Dezembro	0,418	0,333	0,342	0,667	0,616	0,621
Cuiabá	Março	0,313	0,220	0,377	0,559	0,508	0,608
	Junho	-0,066	-0,202	-0,122	0,474	0,497	0,484
	Setembro	0,963	0,888	0,724	1,121	1,054	0,912
	Dezembro	0,419	0,309	0,306	0,648	0,582	0,580
Florianópolis	Março	0,067	-0,007	0,115	0,490	0,479	0,507
	Junho	-0,050	-0,128	-0,054	0,211	0,229	0,220
	Setembro	0,029	-0,075	0,065	0,652	0,652	0,659
Ji-Paraná	Março	0,810	0,703	0,904	1,058	0,978	1,145
	Junho	-0,973	-1,067	-1,176	1,199	1,275	1,362
	Setembro	0,841	0,726	0,510	0,995	0,897	0,722
	Dezembro	0,742	0,641	0,754	0,878	0,795	0,890
Ourinhos	Março	0,459	0,412	0,466	0,804	0,764	0,806
	Junho	-0,007	-0,081	-0,023	0,258	0,267	0,263
	Setembro	0,237	0,173	0,224	0,517	0,490	0,514
	Dezembro	0,353	0,230	0,328	0,583	0,517	0,568
Palmas	Março	0,243	0,172	0,335	0,618	0,599	0,669
	Junho	-1,280	-1,368	-1,196	1,468	1,543	1,406
Petrolina	Março	0,492	0,413	0,539	1,399	1,372	1,438
	Dezembro	0,097	0,007	0,158	0,442	0,431	0,476
São Martinho da Serra	Junho	0,137	0,053	0,119	0,297	0,267	0,291
	Setembro	0,088	-0,006	0,126	0,525	0,516	0,523
	Dezembro	0,205	0,041	0,226	0,624	0,594	0,626

A análise dos valores de viés mês de junho mostrou que houve melhoria em apenas três das nove estações avaliadas (Alta Floresta, Palmas e São Martinho da Serra), sendo que em outras duas (Florianópolis e Ourinhos) o viés

das simulações que utilizaram a visibilidade horizontal estimada pela espessura óptica dos aerossóis se manteve na mesma ordem.

No mês de setembro, com exceção apenas de Florianópolis, houve melhoria em todas as sete estações avaliadas. Destas, quatro (Alta Floresta, Brasília, Cuiabá e Ji-Paraná) apresentaram melhorias nas simulações com a visibilidade horizontal estimada pela espessura óptica e duas (Ourinhos e São Martinho do Sul) utilizando a visibilidade horizontal atualizada. Ainda sobre Florianópolis, apesar de não haver melhoria efetiva nas simulações o percentual de viés já era da ordem de 1,0 %, e foi mantido.

Os valores de viés e RMSE para as comparações realizadas com as simulações do mês de dezembro também apresentam melhorias em todas as sete estações avaliadas (Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Matinho do Sul). Destas, duas (Alta Floresta e Cuiabá) apresentaram menores valores de viés e RMSE utilizando a visibilidade horizontal estimada; as restantes apresentaram melhores índices fazendo uso da visibilidade horizontal observada.

A irradiação direta estimada pelo modelo BRASIL-SR foi avaliada utilizando dados de apenas três estações (Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra), e os valores de viés e RMSE são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação direta das simulações realizadas para o ano de 2006.

Irradiação Direta		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Brasília	Março	1,583	1,722	1,664	1,994	2,152	2,075
	Junho	0,201	0,171	0,326	0,963	0,953	1,015
	Setembro	1,637	1,858	1,650	1,946	2,110	1,956
	Dezembro	1,572	1,568	1,610	1,805	1,802	1,842
Florianópolis	Março	1,901	1,986	2,417	2,202	2,282	2,737
	Junho	0,602	0,377	0,740	0,865	0,631	1,027
	Setembro	0,654	0,476	1,042	1,297	1,178	1,615
São Martinho da Serra	Junho	0,737	0,487	0,828	1,207	1,036	1,282
	Setembro	0,526	0,482	1,034	1,550	1,527	1,791
	Dezembro	1,169	0,929	1,790	1,588	1,410	2,136

As comparações entre dados estimados e medidos realizadas no mês de março só foram feitas para as estações de Brasília e Florianópolis, e em nenhuma delas houve melhoria no uso das diferentes bases de visibilidade horizontal.

As estimativas realizadas para o mês de junho foram comparadas com dados nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho do Sul, com melhorias nos valores de viés e RMSE em todas elas. Os valores estiveram mais próximos dos dados medidos nas simulações que utilizaram a visibilidade horizontal observada.

Nas simulações de setembro, os menores valores de viés e RMSE nas estações de Florianópolis e São Martinho da Serra foram observados nas simulações que fizeram uso da visibilidade horizontal observada. Na estação de Brasília, os valores de viés e RMSE das simulações com a visibilidade horizontal estimada estiveram na mesma ordem das simulações de referência.

Já para o mês de dezembro, foram verificadas melhorias nas estações de Brasília e São Martinho da Serra, nas simulações que utilizaram a visibilidade horizontal observada.

A irradiação difusa estimada para o ano de 2006 foi avaliada utilizando dados das estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos, Palmas, Petrolina e São Martinho da Serra, com os valores de viés e RMSE apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação difusa das simulações realizadas para o ano de 2006.

Irradiação Difusa		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Brasília	Março	-0,459	-0,531	-0,554	0,641	0,694	0,718
	Junho	-0,140	-0,181	-0,222	0,442	0,457	0,471
	Setembro	-0,378	-0,454	-0,458	0,542	0,597	0,601
	Dezembro	-0,279	-0,363	-0,374	0,514	0,562	0,574
Cuiabá	Março	-0,142	-0,207	-0,367	0,476	0,492	0,641
	Junho	0,255	0,301	0,187	0,451	0,497	0,413
Ourinhos	Março	0,356	0,290	0,175	0,519	0,482	0,446
	Junho	-0,072	-0,082	-0,156	0,254	0,264	0,283
	Setembro	-0,237	-0,262	-0,372	0,421	0,436	0,506
	Dezembro	-0,135	-0,221	-0,335	0,552	0,567	0,685
Palmas	Março	0,213	0,114	-0,091	0,405	0,364	0,384
Petrolina	Março	-0,176	-0,260	-0,422	0,696	0,723	0,856
	Dezembro	-0,079	-0,174	-0,405	0,363	0,394	0,538
São Martinho da Serra	Junho	-0,053	-0,043	-0,105	0,286	0,289	0,300
	Setembro	-0,103	-0,102	-0,314	0,517	0,514	0,613
	Dezembro	-0,056	-0,088	-0,372	0,423	0,430	0,578

As comparações com estimativas de irradiação difusa feitas para o mês de março nas estações de Brasília, Cuiabá, Ourinhos, Palmas e Petrolina apresentaram melhorias apenas nas estações de Ourinhos e Palmas, utilizando a visibilidade horizontal estimada.

As simulações de junho apresentaram valores de viés e RMSE muito próximos nas simulações realizadas (referência e visibilidade horizontal observada) para

as estações de Brasília, Ourinhos e São Martinho da Serra. Já as estações de Palmas e Cuiabá apresentaram melhorias mais efetivas nos seus índices, utilizando a base de visibilidade horizontal estimada.

A análise dos valores de viés e RMSE das estações de Brasília, Ourinhos e São Martinho da Serra para o mês de setembro mostram que só foram observadas melhorias nas estimativas para este mês, mas na estação de São Martinho da Serra os valores das estimativas de referência e das estimativas utilizando visibilidade horizontal observada permaneceram na mesma ordem. Por fim, as estimativas realizadas para o mês de dezembro para as estações de Brasília, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra não conseguiram superar os valores obtidos pelas simulações de referência.

4.6.2. Avaliação das simulações de 2007

4.6.2.1. Março

A figura 4.57 apresenta os gráficos de correlação entre os dados de irradiação global diária modelada nas três simulações e a irradiação global diária observada. A maior correlação foi verificada em São Martinho da Serra (da ordem de 0,97) e a menor em Brasília (da ordem de 0,73).

Os gráficos com os valores diários de irradiação global estimada pelas três simulações, além dos valores diários medidos no mês de março de 2007 são apresentados na figura 4.58. Devido a problemas com as imagens disponíveis pelo grupo para este para este mês, apenas doze dias foram simulados. Para avaliação da irradiação direta estimada, estavam disponíveis dados das estações de Brasília e São Martinho da Serra. Tanto os gráficos de correlação como os de valores diários são apresentados na figura 4.59.

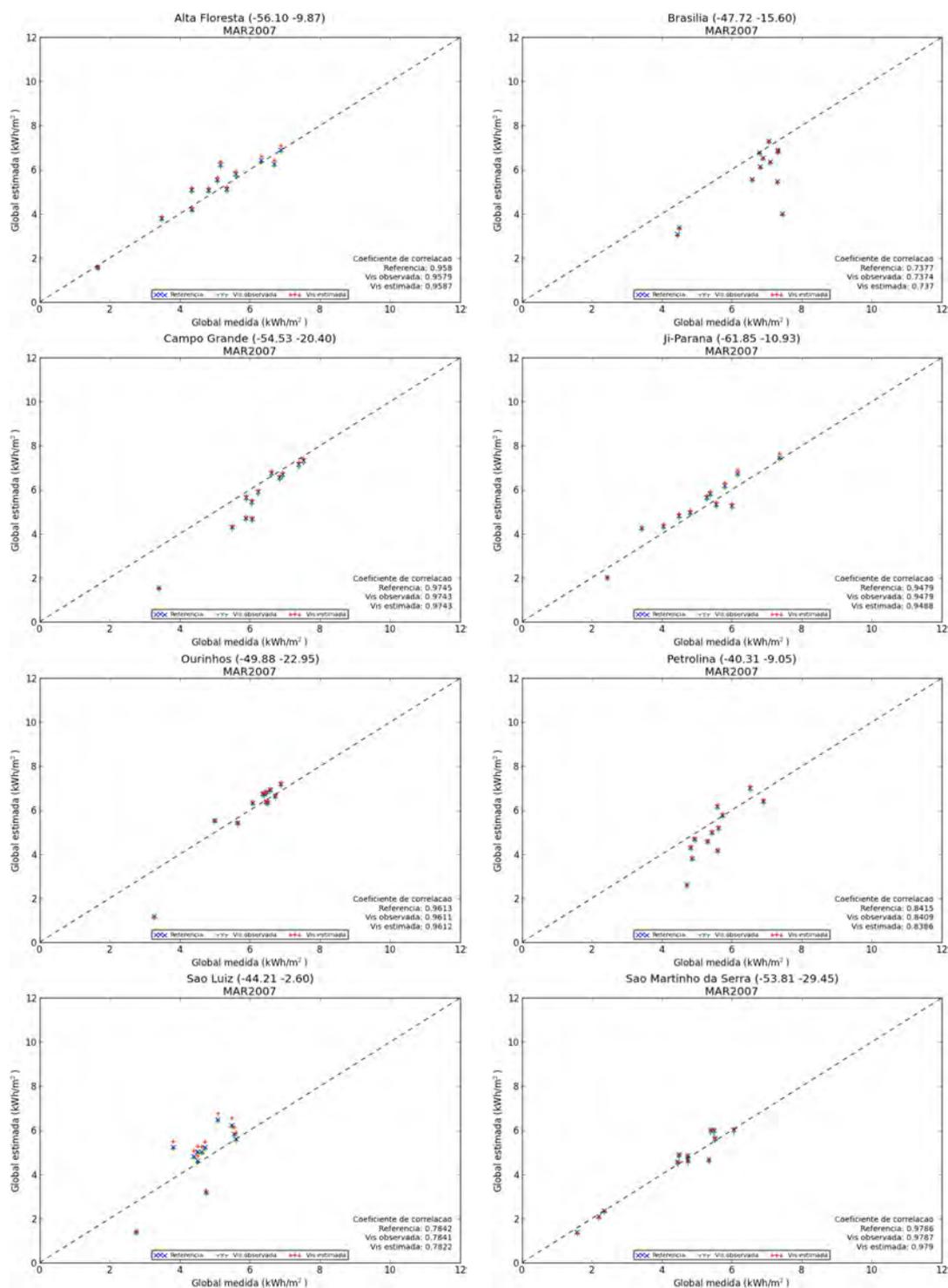


Figura 4.57 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

Na figura 4.60 são apresentados os gráficos de correlação entre os dados de irradiação difusa diária modelada nas três simulações e a irradiação difusa diária observada, nas estações de Brasília, Campo Grande, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra. Os valores diários das simulações e os medidos no mesmo período são apresentados na figura 4.61.

Assim como no ano de 2006, a correlação entre os valores modelados e o valor medido é menor que a observada na radiação global e direta. As maiores correlações foram da ordem de 0,8 em Campo Grande, enquanto que a menor foi verificada em Ourinhos, em torno de 0,2.

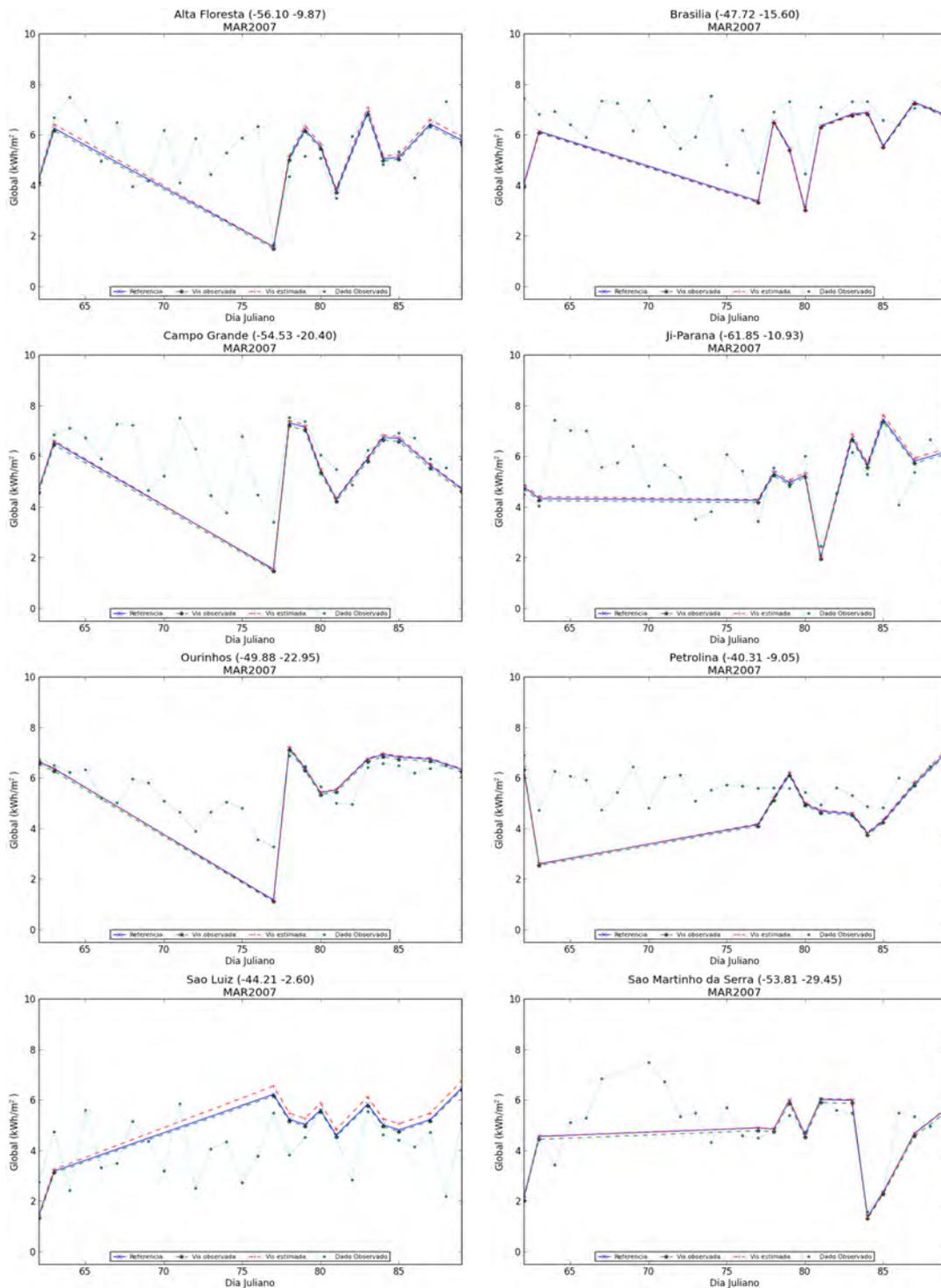


Figura 4.58 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

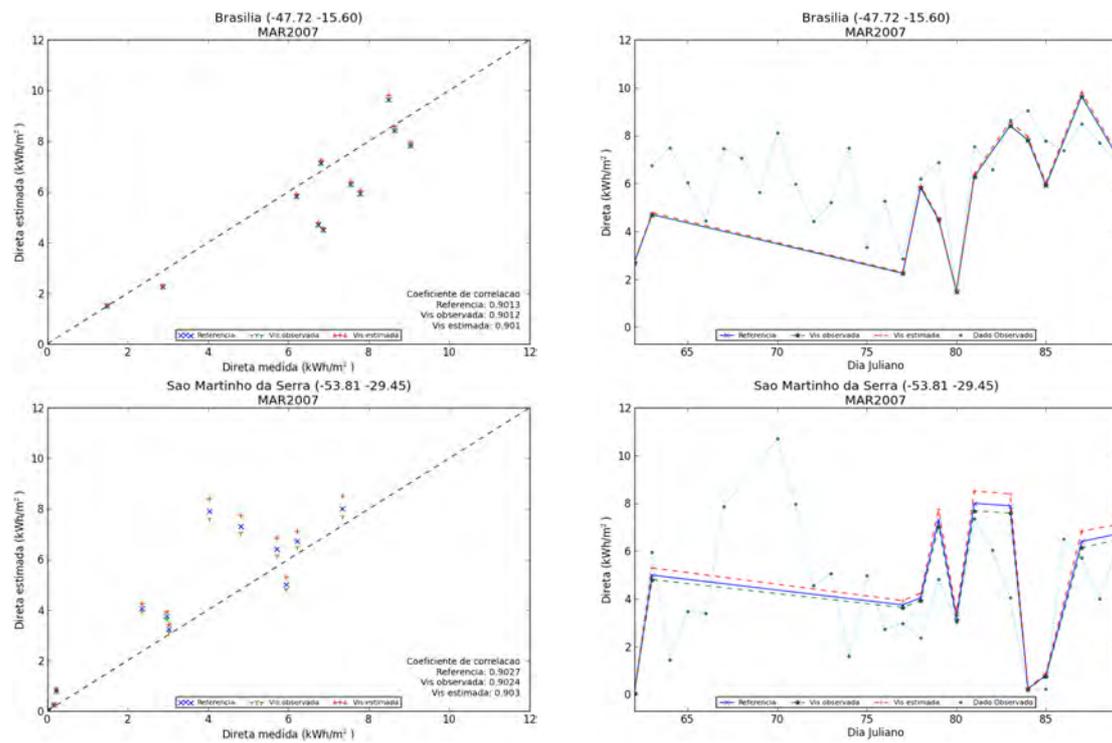


Figura 4.59 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de março de 2007, nas estações de Brasília e São Martinho da Serra.

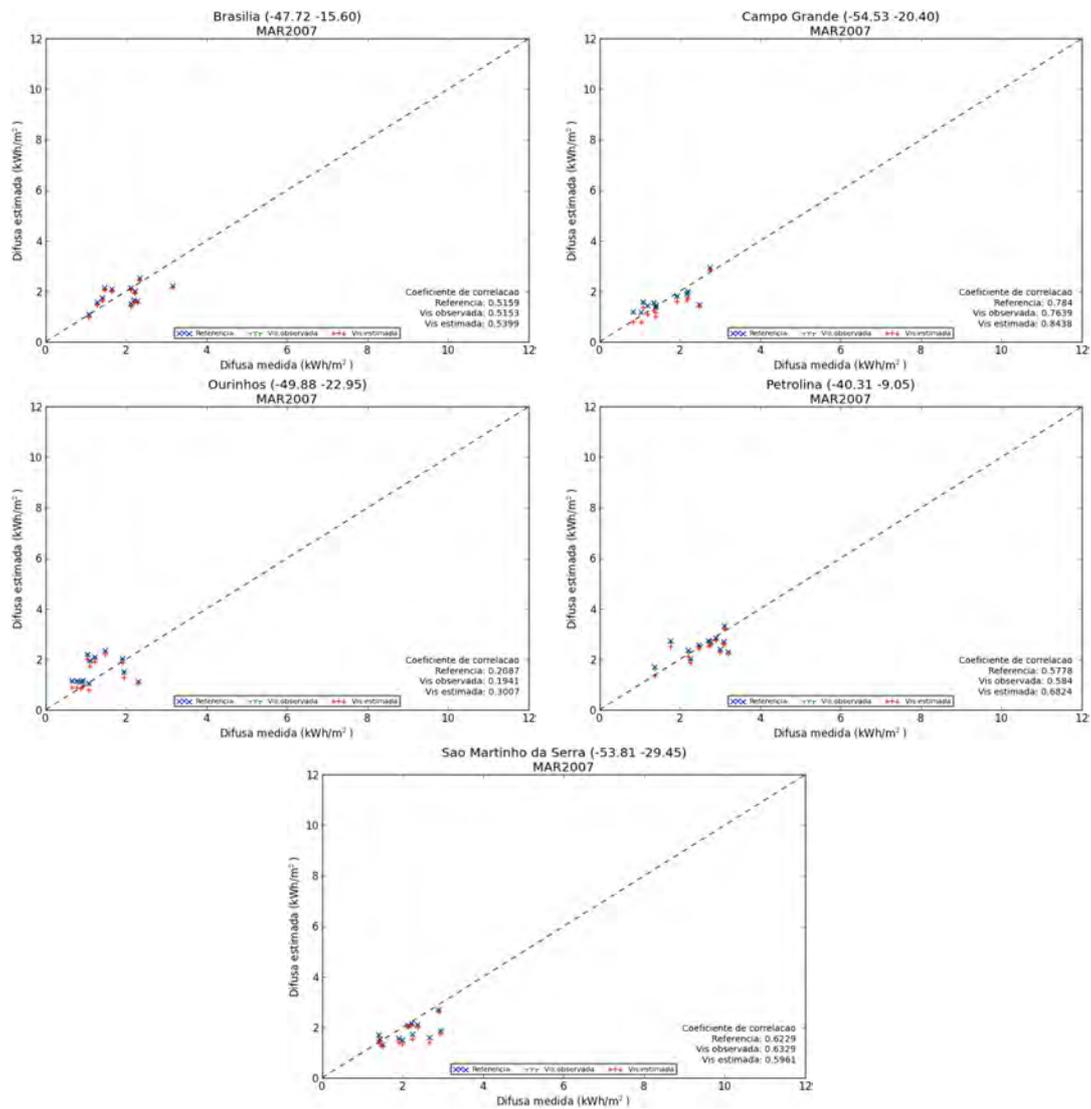


Figura 4.60 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

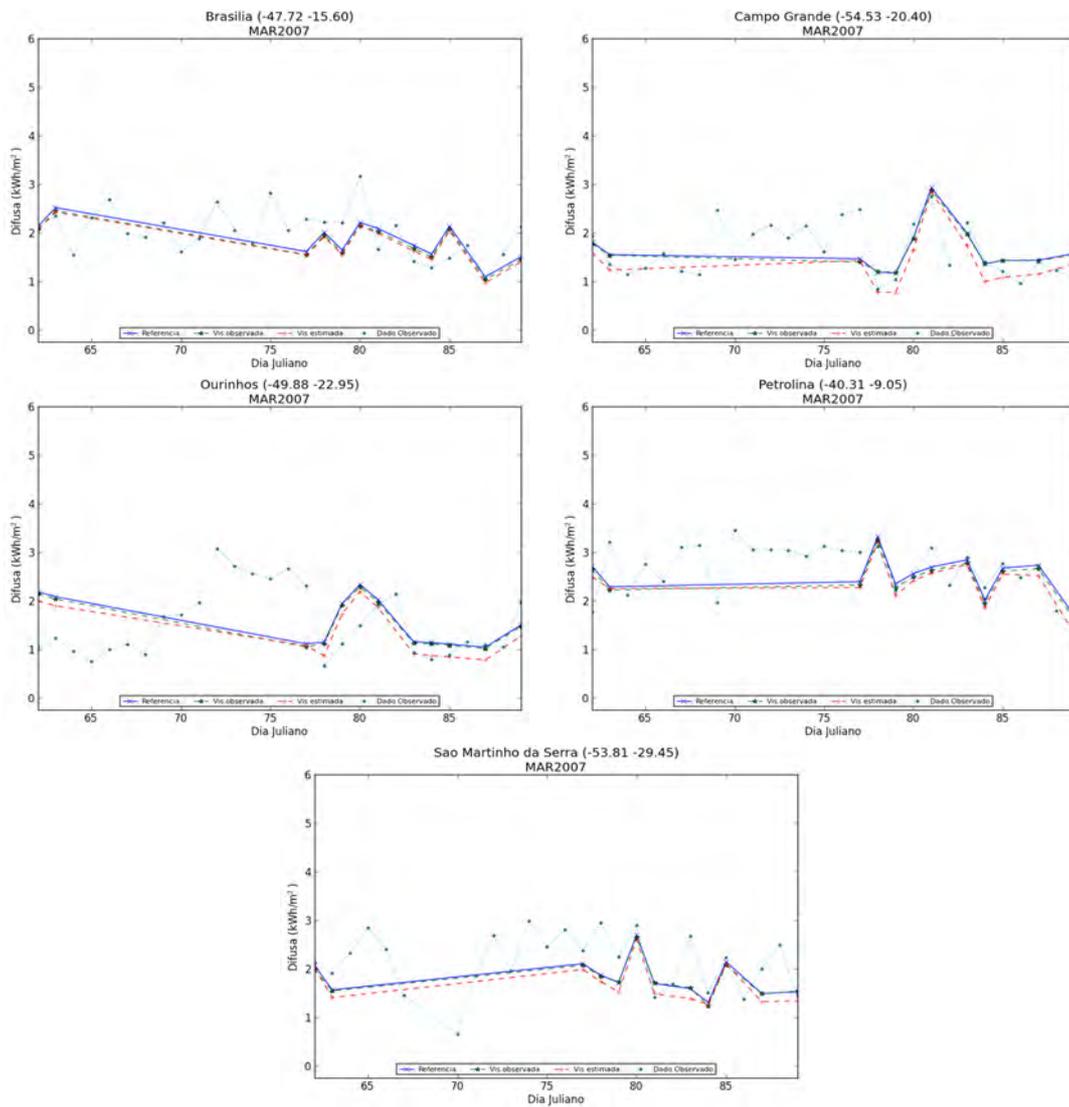


Figura 4.61 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

4.6.2.2. Junho

A figura 4.62 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de junho de 2007. Verificou-se maiores valores de correlação nas estações de Campo Grande, Cuiabá e São Martinho da Serra (acima de 0,96) e os menores valores foram observados nas estações de Alta Floresta e Brasília (0,54 e 0,77, respectivamente).

Os gráficos de valores diários de irradiação global estimada pelas três simulações e os medidos no mesmo período são apresentados na figura 4.63. Assim como em 2006, o BRASIL-SR tende a subestimar os valores nas estações de Alta Floresta, Brasília e Ji-Paraná.

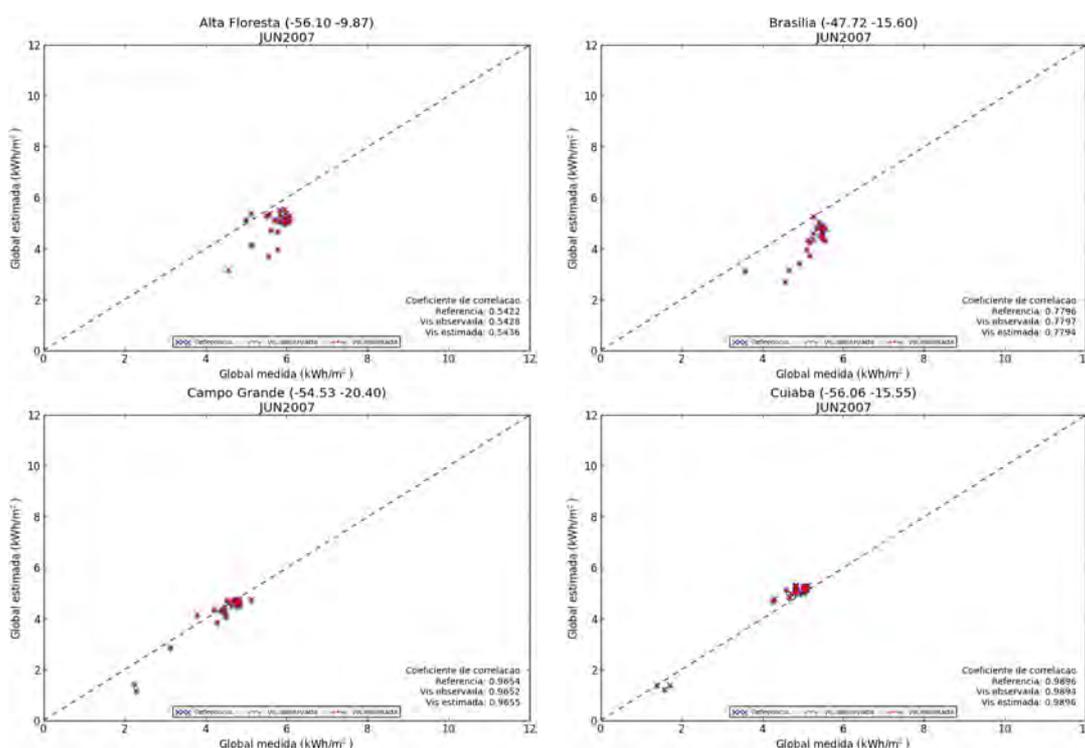
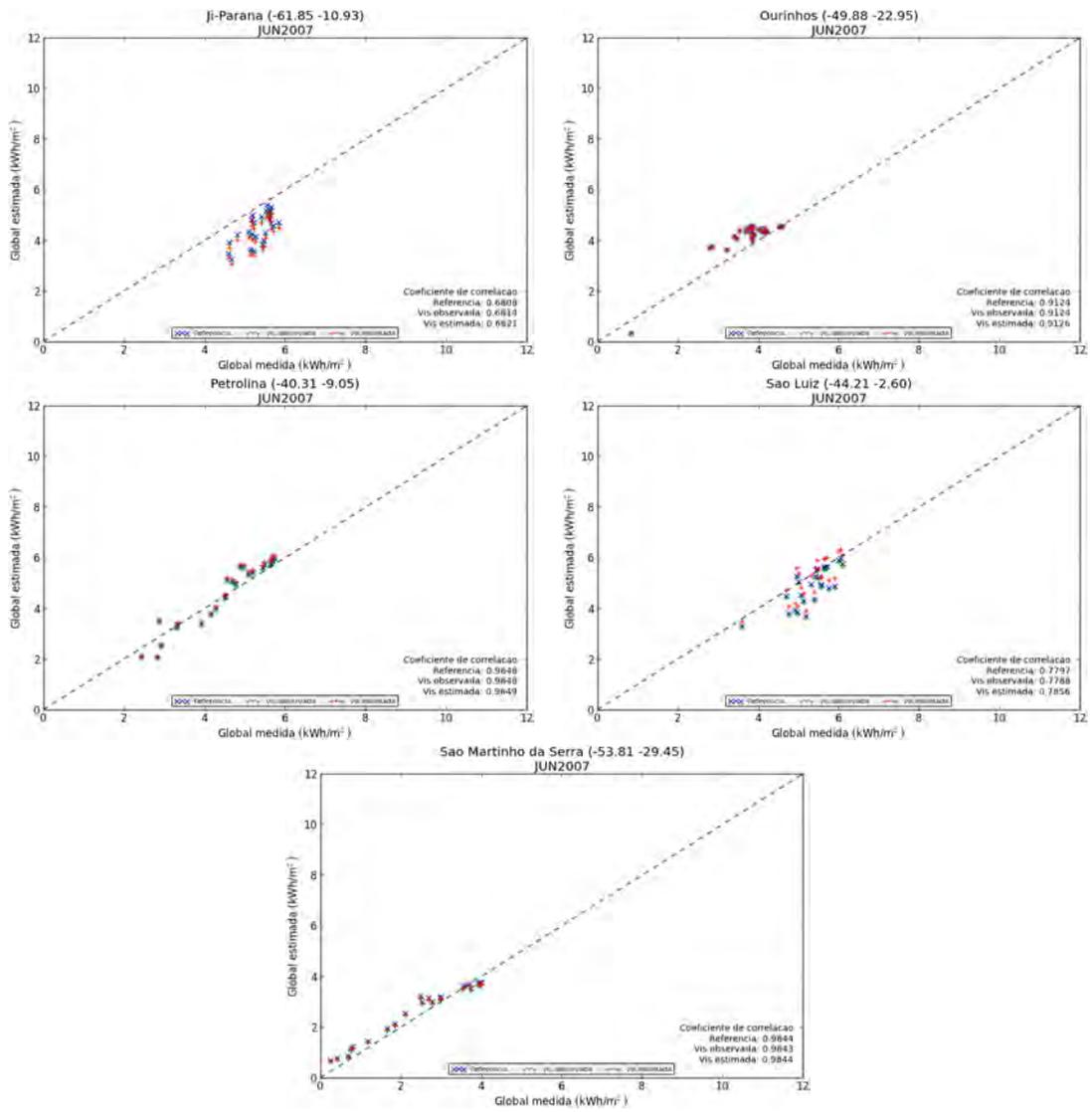


Figura 4.62 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.62.

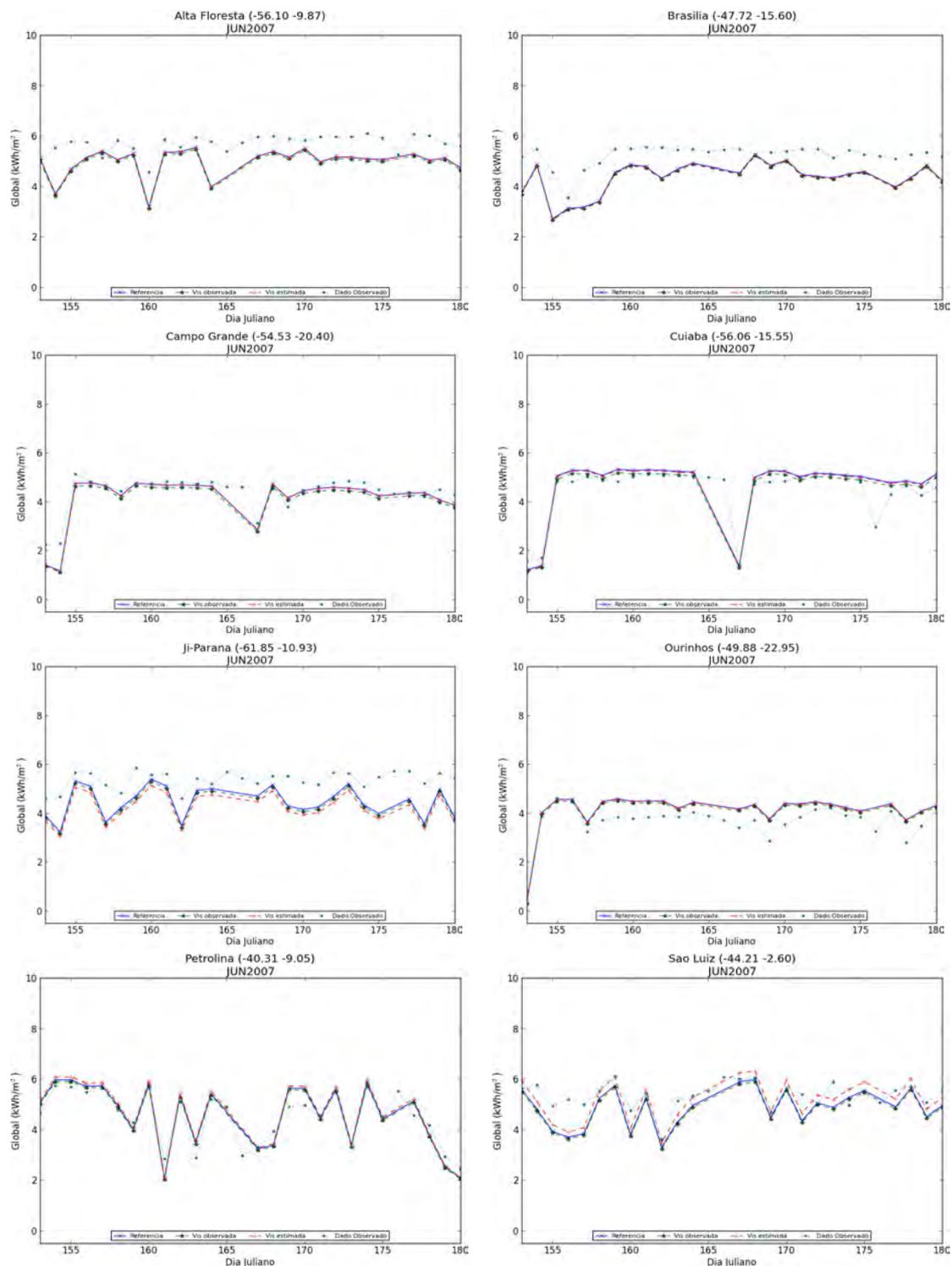
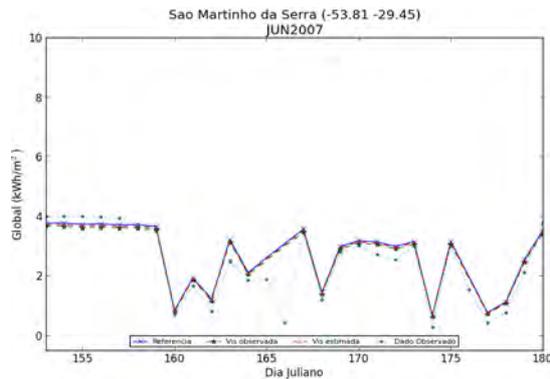


Figura 4.63 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.63.

Os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação direta estimada e irradiação direta medida, juntamente com os valores diários no mês de junho são apresentados na figura 4.64. A correlação entre os dados estimados e os dados medidos esteve acima de 0,93 nas estações de Petrolina e São Martinho da Serra e na ordem de 0,75 na estação de Brasília. Destaca-se o fato de que em Brasília, o modelo tendeu a subestimar os valores de irradiação direta.

A figura 4.65 apresenta os gráficos de correlação entre os dados de irradiação difusa estimada e irradiação difusa medida no mês de junho de 2007. As maiores correlações foram observadas nas estações de Ourinhos e Petrolina, nas simulações com a visibilidade horizontal estimada (0,81 e 0,83, respectivamente).

Os valores diários de irradiação difusa estimada e os totais medidos em junho são apresentados na figura 4.66, onde destaca-se uma tendência do modelo em subestimar os valores em Brasília, Campo Grande e Cuiabá.

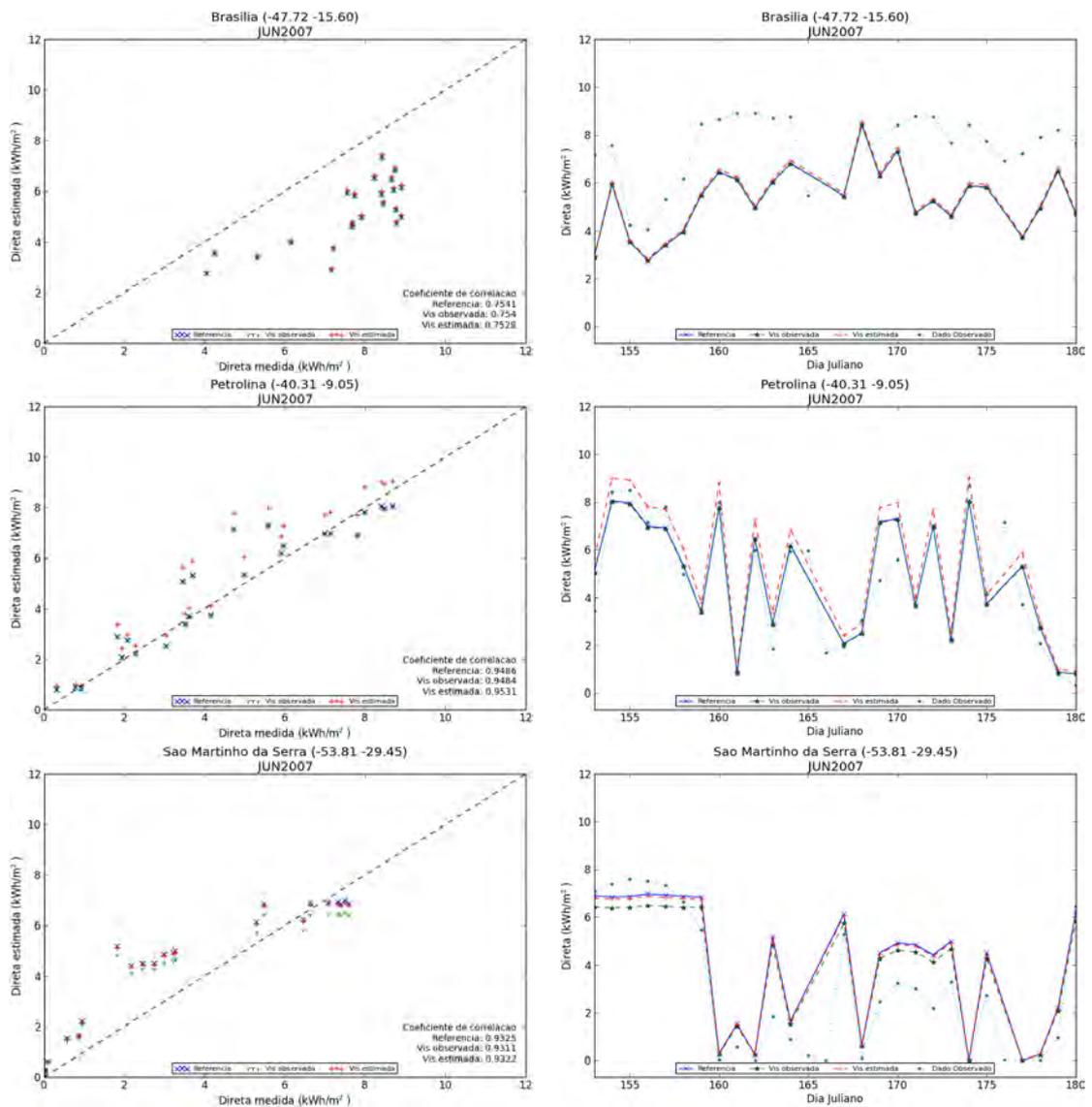


Figura 4.64 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2007, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.

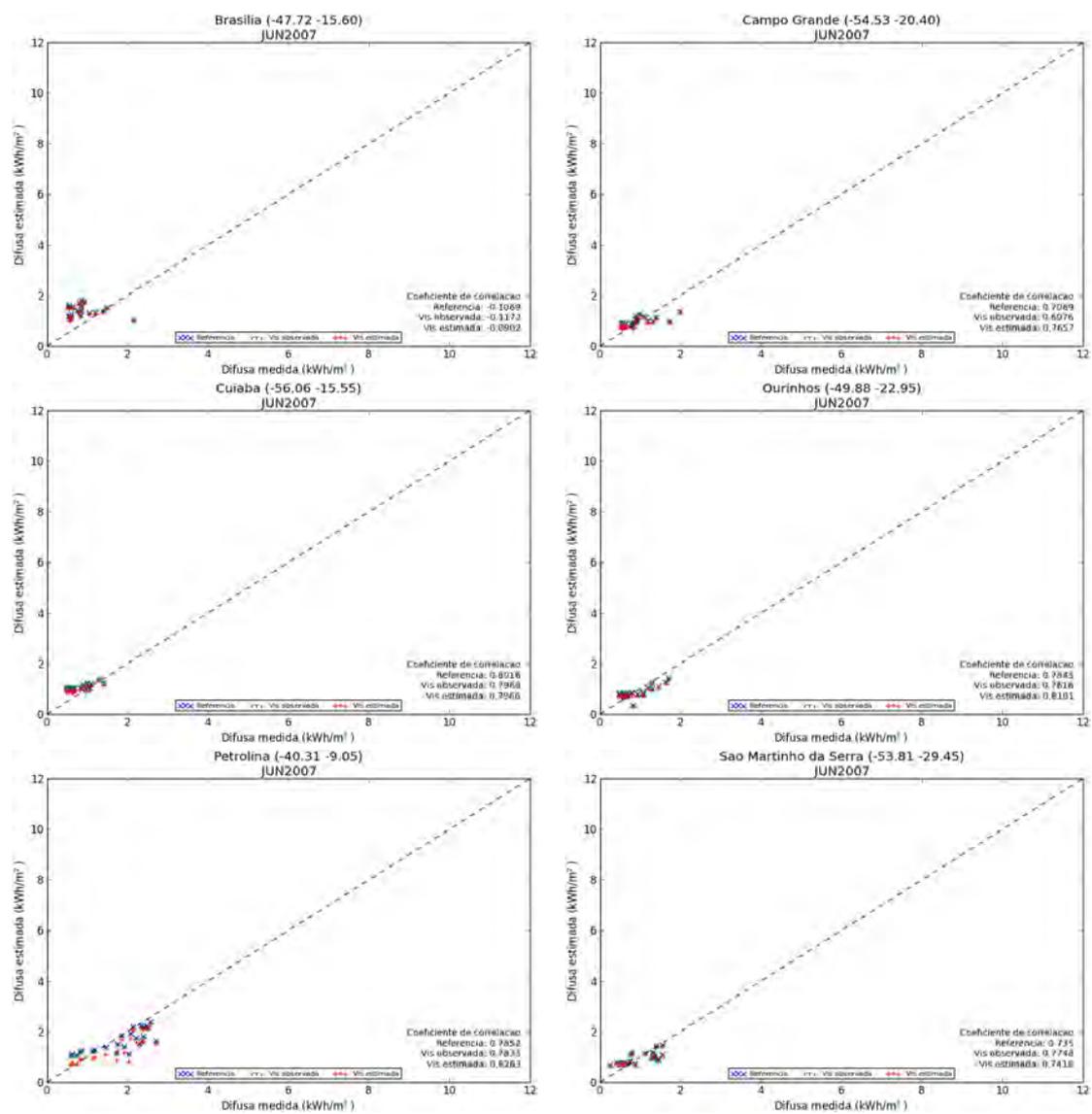


Figura 4.65 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

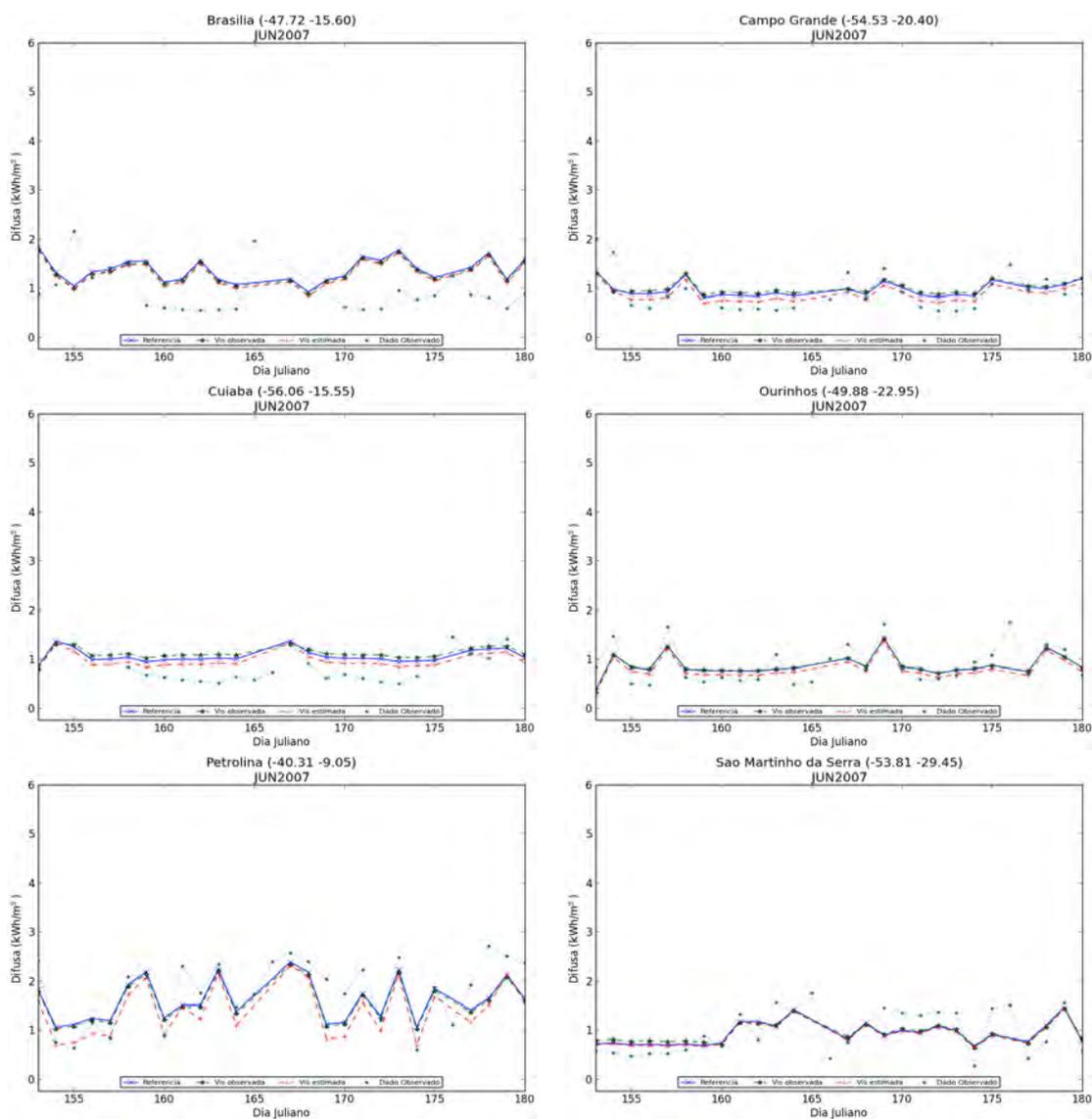


Figura 4.66 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.

4.6.2.3. Setembro

A figura 4.67 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de setembro de 2007. As maiores correlações observadas neste mês foram da ordem de 0,97, nas estações de Cuiabá, Petrolina e São Martinho da Serra. O modelo tendeu a

subestimar os valores para as estações de Natal e Brasília, e superestimar a maior parte das estimativas para as estações de Alta Floresta, Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos e Palmas, conforme os gráficos de irradiação estimada e medida apresentados na figura 4.68.

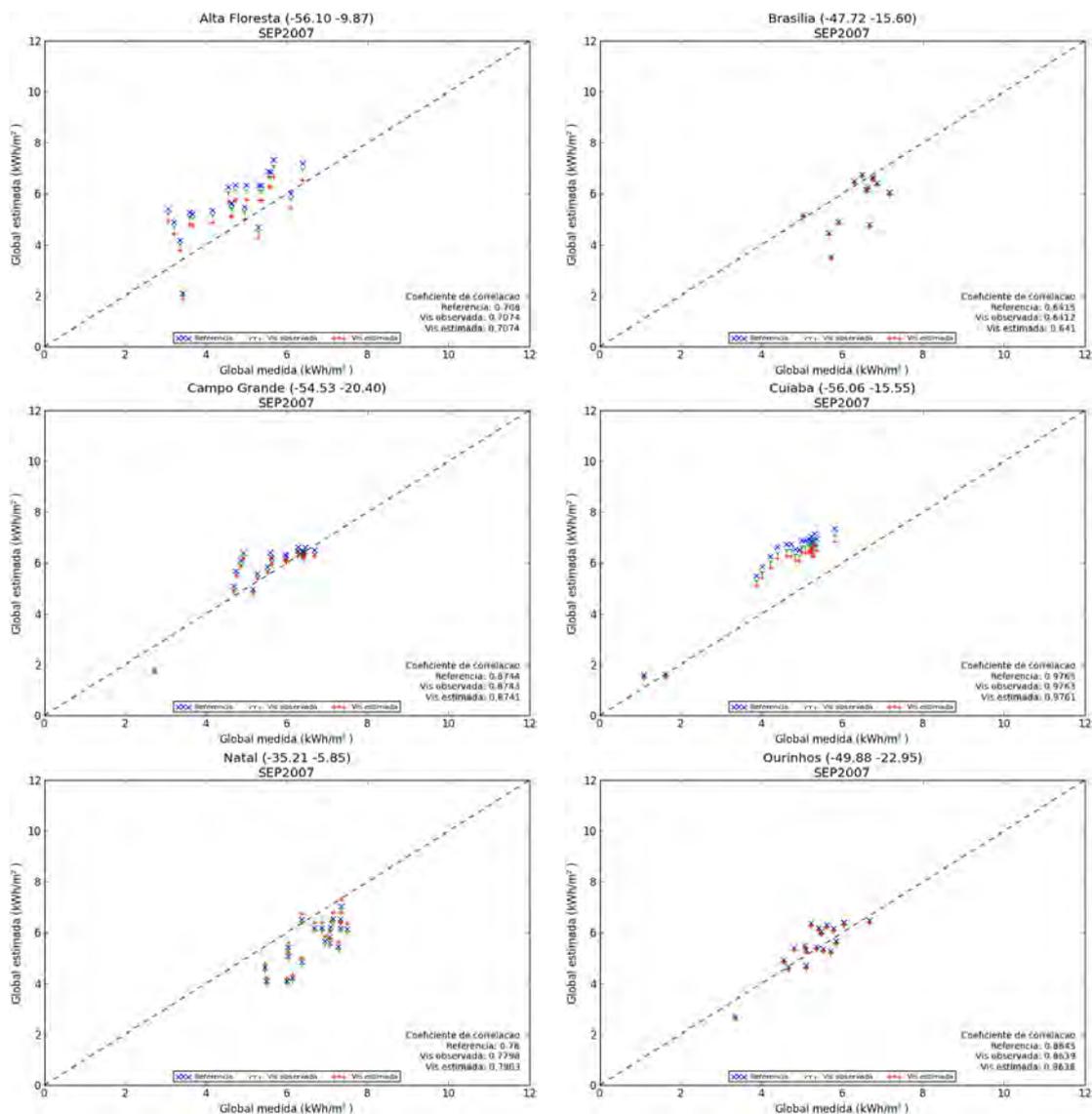
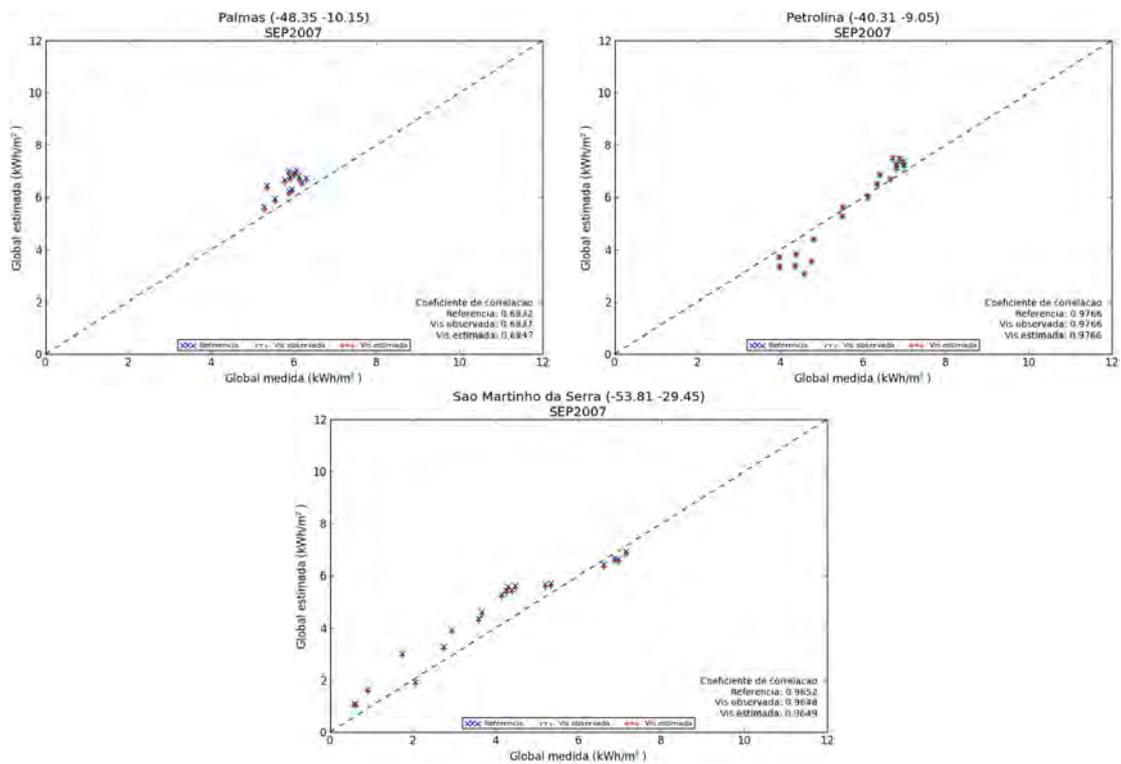


Figura 4.67 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.67.

A correlação entre dos dados de irradiação direta estimada e irradiação direta medida nas estações de Brasília e São Martinho da Serra pode ser observada na figura 4.69, com valores acima de 0,87 e 0,84 verificados. A tendência de superestimativa do BRASIL-SR, verificada no setembro anterior, foi observada mais uma vez na estação de São Martinho, mas não em Brasília.

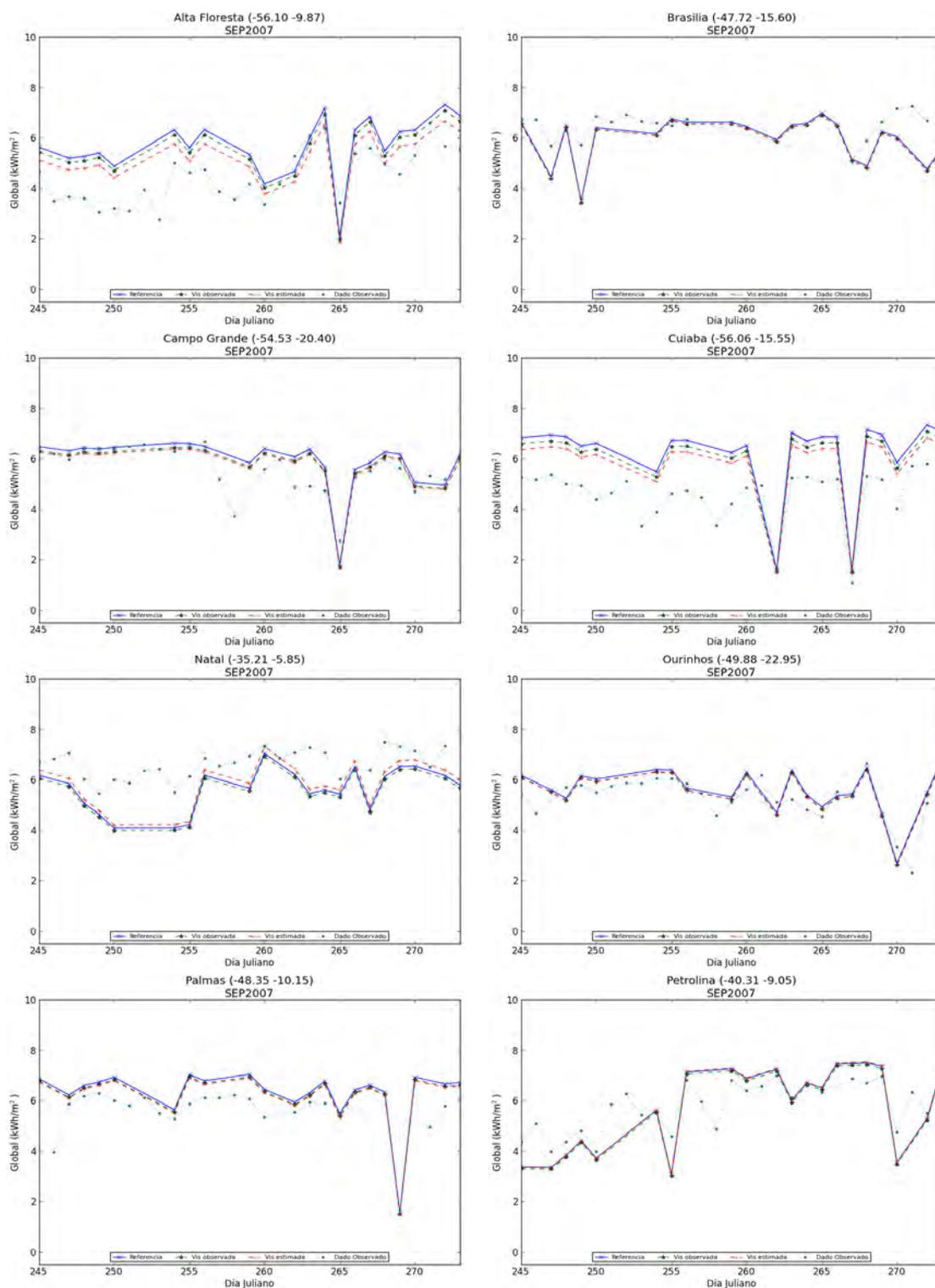
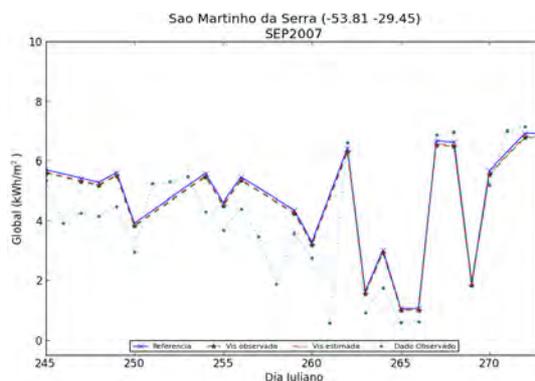


Figura 4.68 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.68.

Já as correlações entre os dados de irradiação difusa estimados e os dados medidos nas estações de Brasília, Campo Grande, Natal, Ourinhos e Palmas, são apresentados na figura 4.70 e seus valores diários apresentados na figura 4.71.

Destaca-se a baixa correlação entre os valores estimados e medidos na estação de Natal (chegando a 0,01 na simulação referência), indicando que apesar da proximidade dos valores absolutos obtidos, o modelo teve dificuldade em representar o comportamento da variável durante o mês. As melhores correlações foram observadas nas estações de Campo Grande e Ourinhos (chegando a 0,87 e 0,81, respectivamente).

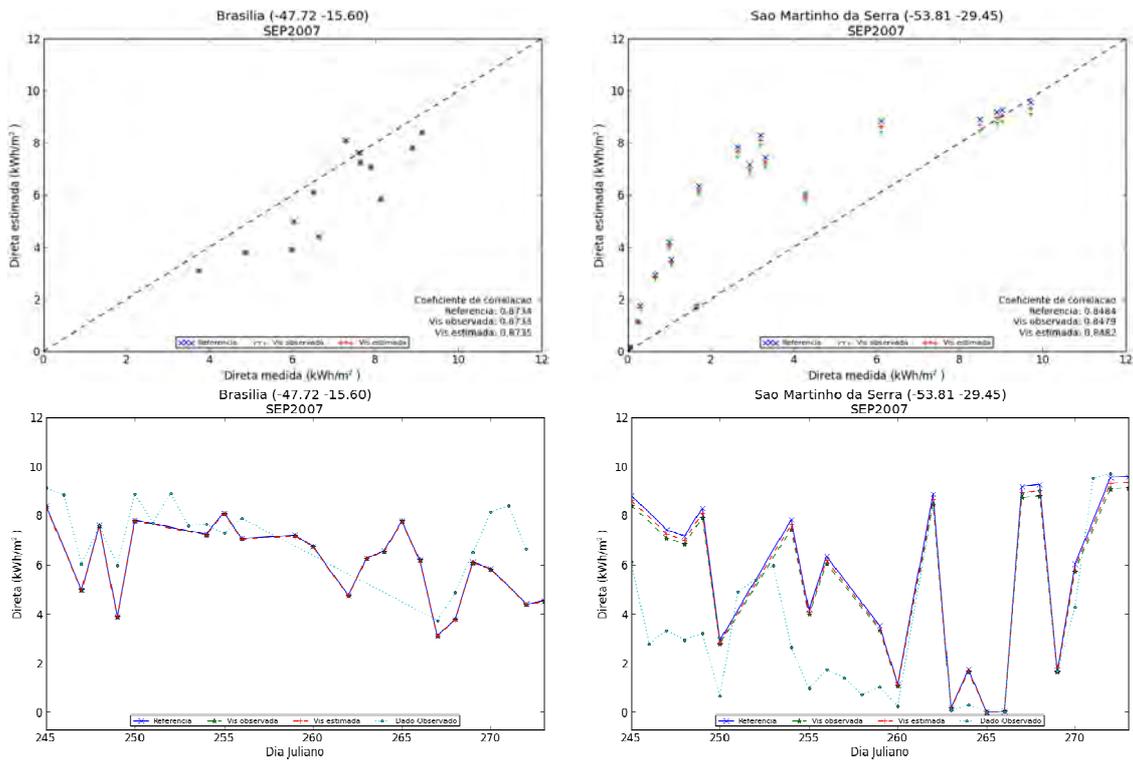


Figura 4.69 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Brasília e São Martinho da Serra.

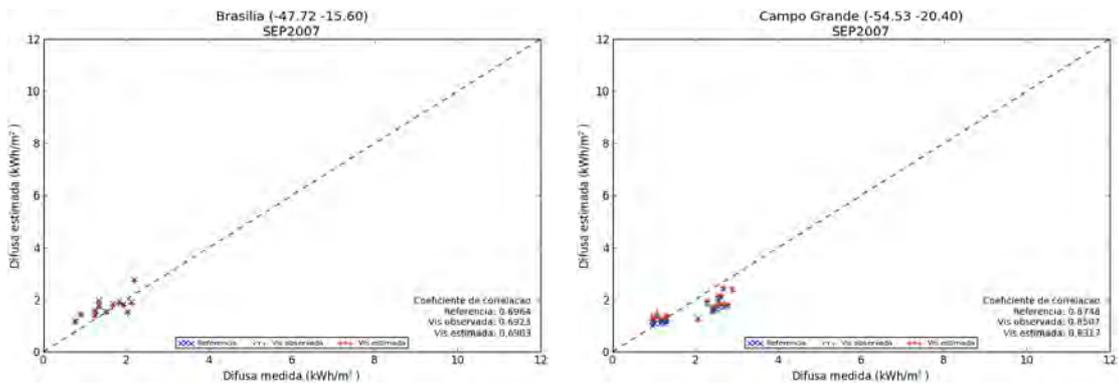
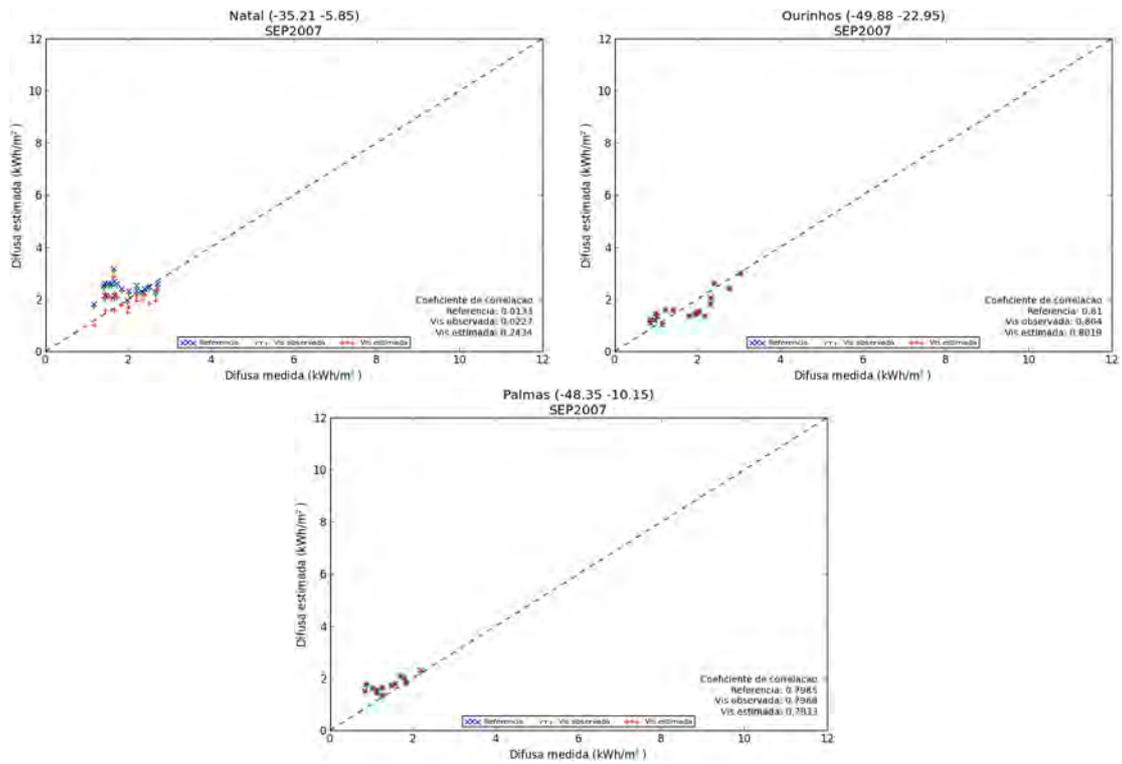


Figura 4.70 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Natal, Ourinhos e Palmas.



Continuação da figura 4.70.

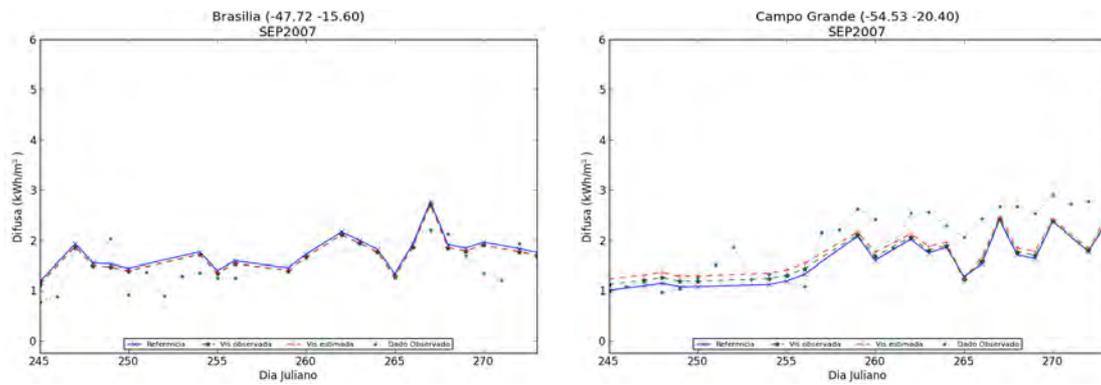
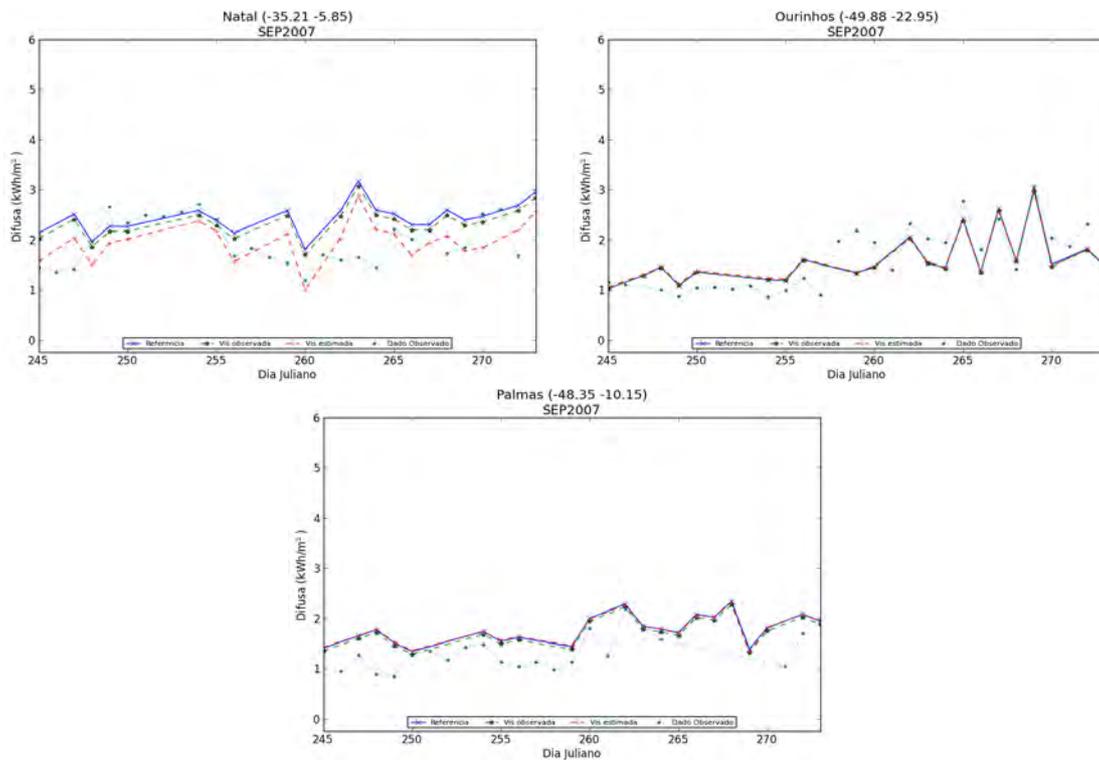


Figura 4.71 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2007, nas estações de Brasília, Campo Grande, Natal, Ourinhos e Palmas.



Continuação da figura 4.71.

4.6.2.4. Dezembro

A figura 4.72 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de dezembro de 2007. A estação de São Martinho da Serra apresentou a melhor correlação dentre as analisadas (0,97). Com exceção desta e da estação de Natal, há uma tendência do modelo em superestimar os valores de irradiação global neste mês.

A correlação e os valores diários das estimativas e dos dados medidos de irradiação direta na estação de São Martinho da Serra são apresentados na figura 4.74. Verificou-se que apesar da alta correlação, o modelo superestimou os valores de irradiação direta neste período.

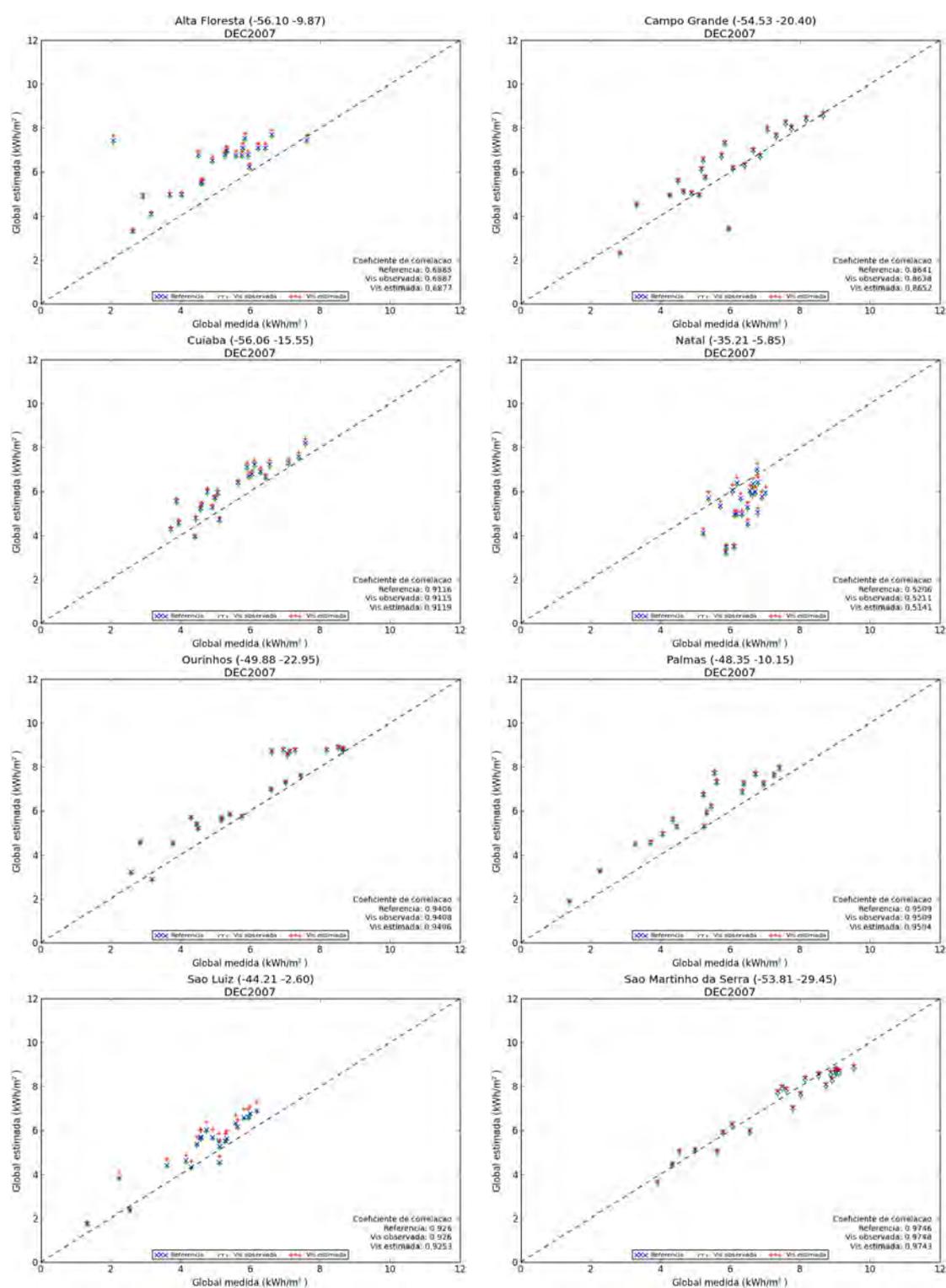


Figura 4.72 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.

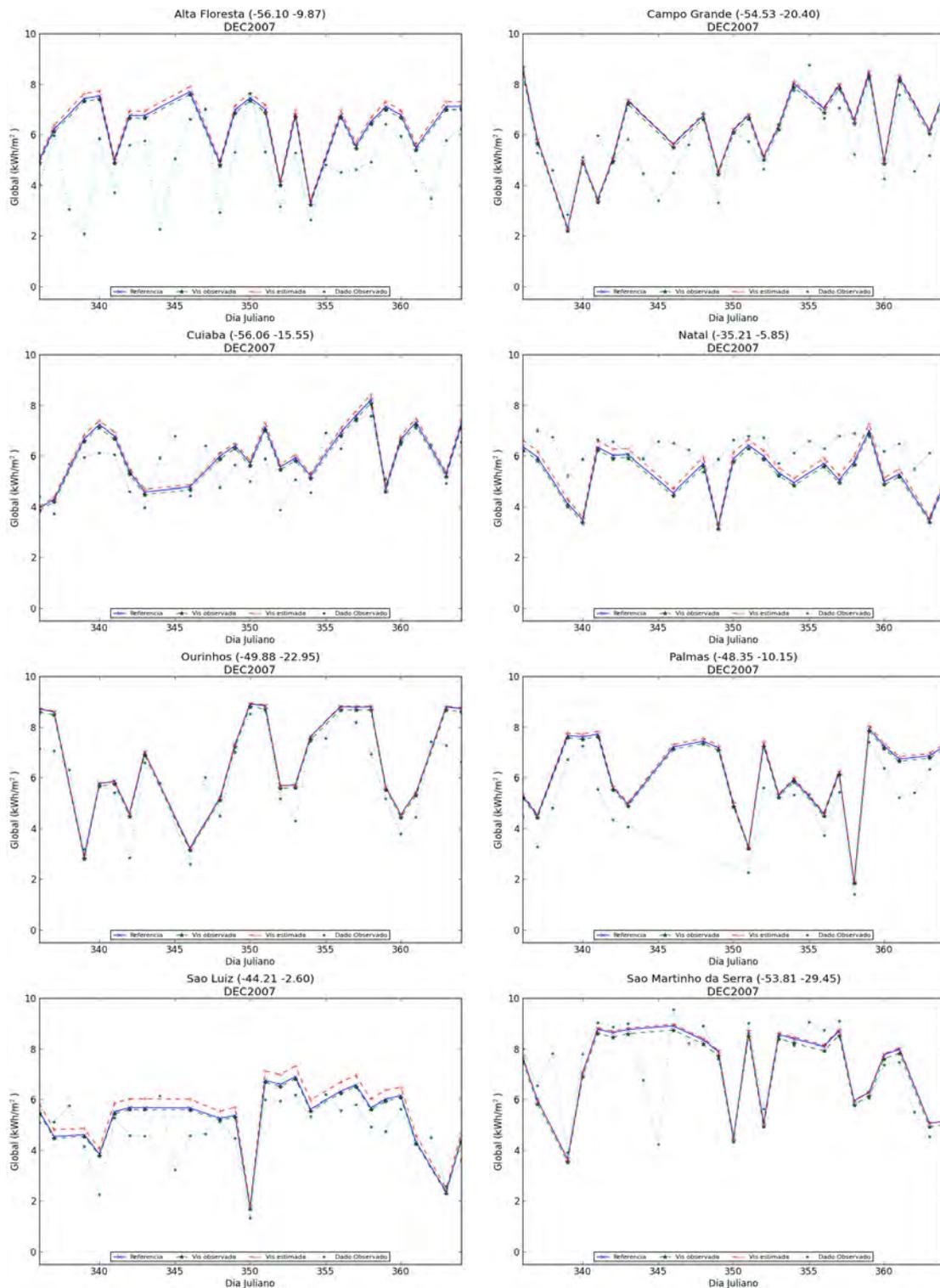


Figura 4.73 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2007, nas estações de Alta Floresta, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.

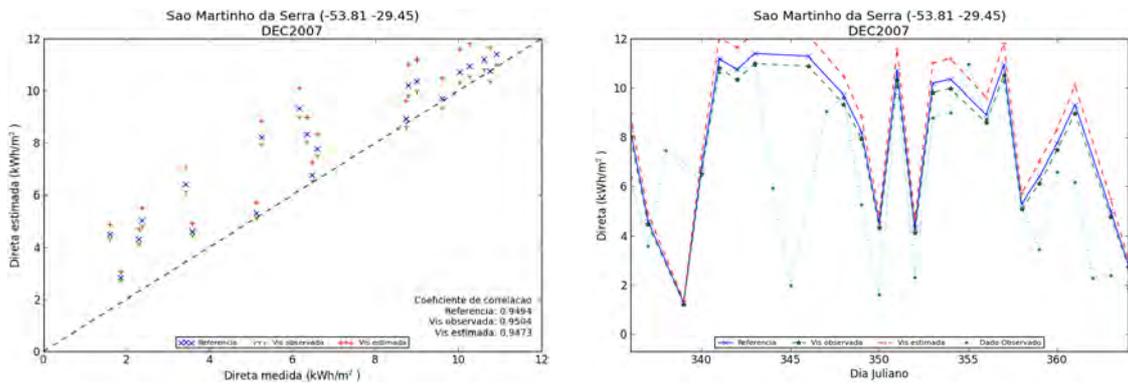


Figura 4.74 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2007, na estação de São Martinho da Serra.

Já a correlação entre os dados de irradiação difusa estimados e medidos e os valores diários são apresentados nas figuras 4.75 e 4.76. A maior correlação verificada foi na estação de Ourinhos (da ordem de 0,9), enquanto que a menor foi verificada em Cuiabá, atingindo 0,56. Os gráficos com os valores diários de estimados e medidos para o período são apresentados na figura 4.76.

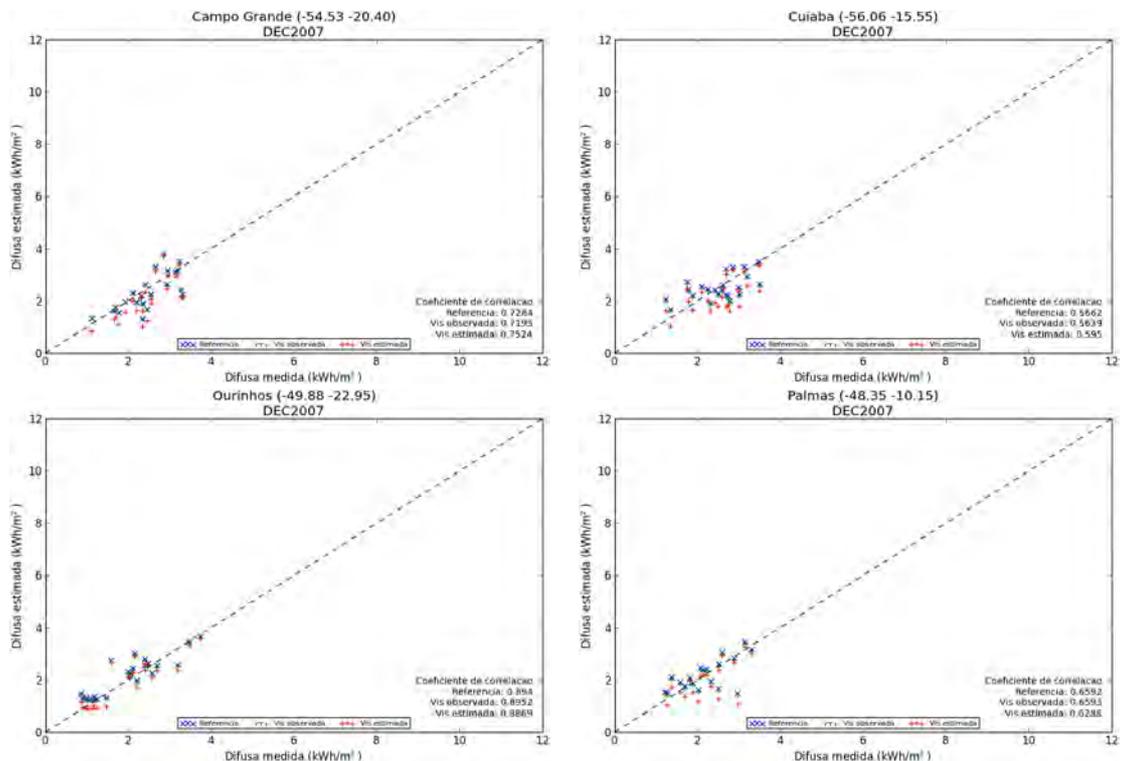
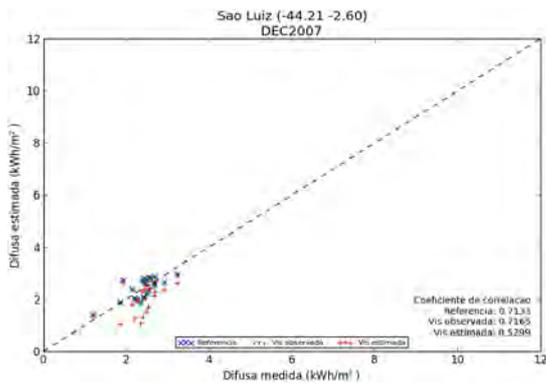


Figura 4.75 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) em dezembro de 2007, em Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.75.

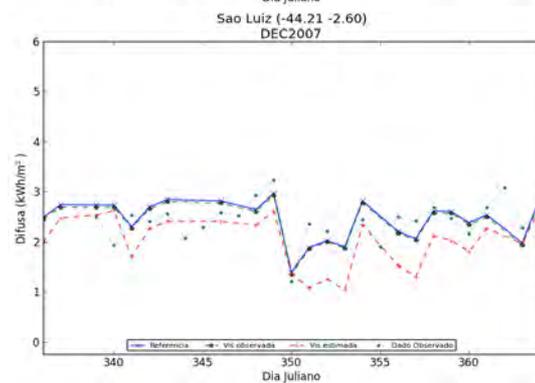
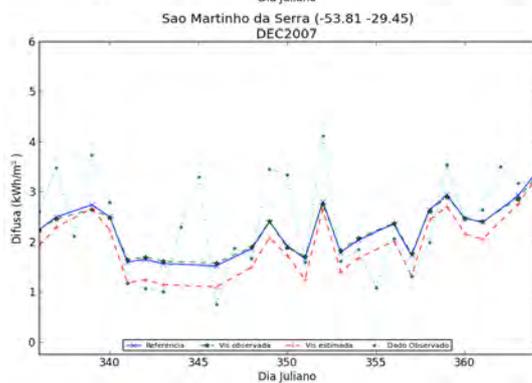
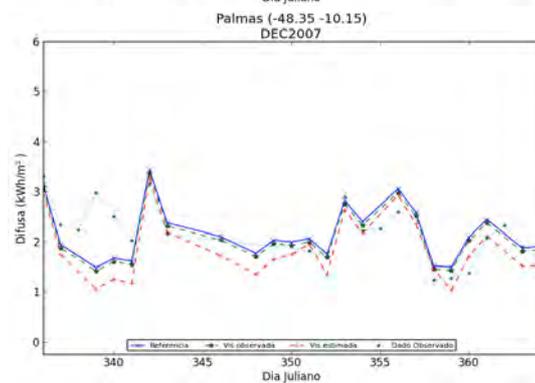
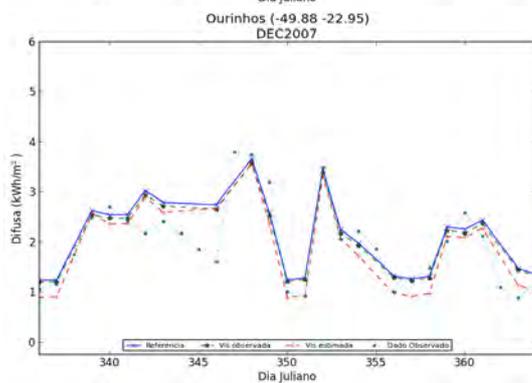
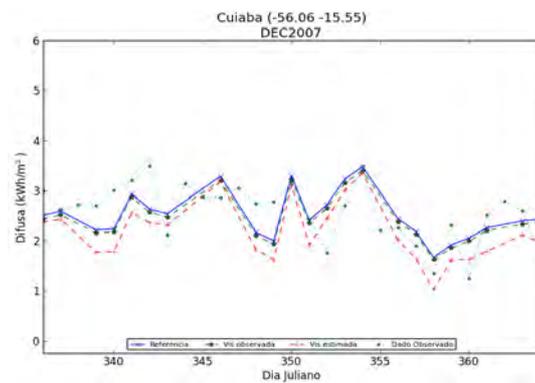
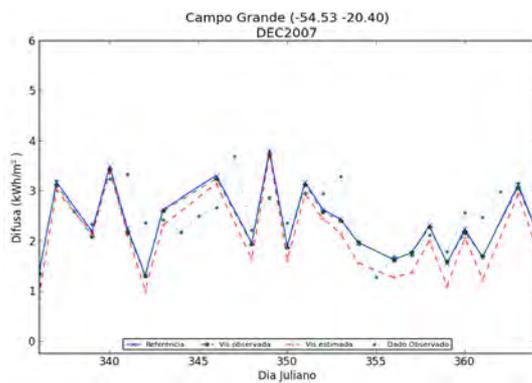


Figura 4.76 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2007, nas estações de Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.

4.6.2.5. Discussão

As tabelas seguintes apresentam os valores de viés e da raiz do erro médio quadrático (RMSE) da irradiação global, direta e difusa para todas as estações avaliadas nas simulações do ano de 2007.

A avaliação da irradiação global estimada pelas três simulações é apresentada na tabela 4.4. Verifica-se que no mês de março, a irradiação global apresentou melhorias em sete das oito avaliadas, sendo apenas a estação de Brasília aquela onde a simulação de referência obteve os melhores valores de viés e RMSE. A visibilidade horizontal observada apresentou os melhores índices nas estações de Alta Floresta, Ji-Paraná, São Luiz e São Martinho da Serra, enquanto que as simulações que utilizaram a visibilidade horizontal estimada pela espessura óptica mostraram melhores resultados nas estações de Campo Grande, Ourinhos e Petrolina.

No mês de junho, das nove estações avaliadas, foram verificadas melhorias em cinco delas. As estações onde as simulações de referência continuaram apresentando os melhores resultados foram as de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande e Ji-Paraná; porém, é importante mencionar que em Alta Floresta e Campo Grande, os valores de viés e RMSE das simulações que utilizaram a visibilidade horizontal estimada estiveram na mesma ordem de grandeza da simulação referência. Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra apresentaram melhores resultados com a visibilidade horizontal observada e Cuiabá e São Luiz apresentaram melhorias nos resultados com a visibilidade horizontal estimada pela espessura óptica os aerossóis.

Tabela 4.4 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação global das simulações realizadas para o ano de 2007.

Irradiação Global		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Alta Floresta	Março	0,177	0,095	0,288	0,439	0,413	0,500
	Junho	-0,753	-0,826	-0,762	0,894	0,954	0,902
	Setembro	1,006	0,812	0,492	1,298	1,145	0,916
	Dezembro	1,324	1,218	1,479	1,665	1,581	1,797
Brasília	Março	-0,943	-1,006	-0,982	1,327	1,373	1,359
	Junho	-0,888	-0,936	-0,911	0,975	1,019	0,997
	Setembro	-0,652	-0,719	-0,721	1,002	1,048	1,049
Campo Grande	Março	-0,638	-0,744	-0,583	0,867	0,940	0,848
	Junho	-0,185	-0,288	-0,189	0,353	0,409	0,359
	Setembro	0,314	0,157	0,102	0,610	0,538	0,520
	Dezembro	0,374	0,244	0,421	0,887	0,836	0,916
Cuiabá	Junho	0,209	0,079	0,180	0,308	0,225	0,291
	Setembro	1,618	1,395	1,187	1,695	1,471	1,260
	Dezembro	0,615	0,505	0,740	0,776	0,690	0,883
Ji-Paraná	Março	0,164	0,078	0,259	0,453	0,427	0,504
	Junho	-0,847	-0,939	-1,076	0,960	1,040	1,159
Natal	Setembro	-1,063	-1,175	-0,870	1,191	1,291	1,039
	Dezembro	-0,982	-1,097	-0,782	1,297	1,382	1,189
Ourinhos	Março	-0,014	-0,099	0,008	0,673	0,674	0,691
	Junho	0,438	0,367	0,424	0,551	0,494	0,541
	Setembro	0,196	0,112	0,101	0,492	0,463	0,459
	Dezembro	0,793	0,679	0,797	1,025	0,938	1,034
Palmas	Setembro	0,682	0,593	0,551	0,745	0,664	0,625
	Dezembro	0,888	0,800	0,962	1,020	0,945	1,090
Petrolina	Março	-0,539	-0,605	-0,488	0,901	0,942	0,893
	Junho	0,080	0,022	0,159	0,381	0,370	0,426
	Setembro	-0,119	-0,193	-0,107	0,624	0,638	0,638
São Luiz	Março	0,230	0,164	0,455	0,900	0,884	1,048
	Junho	-0,482	-0,551	-0,179	0,668	0,717	0,522
	Dezembro	0,612	0,539	0,916	0,778	0,721	1,050
São Martinho da Serra	Março	0,055	-0,051	0,055	0,333	0,324	0,340
	Junho	0,153	0,071	0,111	0,307	0,290	0,292
	Setembro	0,586	0,478	0,506	0,795	0,725	0,742
	Dezembro	-0,137	-0,292	-0,100	0,415	0,491	0,402

No mês de setembro, de nove estações avaliadas, o modelo apresentou melhores resultados em oito delas (apenas Brasília mostrou melhores

resultados com a simulação referência). Destas, sete apresentaram menores valores de viés e RMSE nas simulações com visibilidade horizontal estimada (Alta Floresta, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina).

Já em dezembro, houve melhoria em todas as estações avaliadas, mas apenas duas (Natal e São Martinho da Serra) apresentaram menores valores de viés e RMSE com a visibilidade horizontal estimada. As demais (Alta Floresta, Campo Grande, Cuiabá, Ourinhos, Palmas e São Luiz) tiveram melhor desempenho utilizando a visibilidade horizontal observada.

A irradiação direta modelada foi avaliada com poucos dados, sendo os valores apresentados na tabela 4.5.

Março apresentou melhoria apenas na estação de Brasília, utilizando a visibilidade horizontal estimada, enquanto que na estação de São Martinho da Serra, houve melhoria com o uso da visibilidade horizontal observada.

Tabela 4.5 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação direta das simulações realizadas para o ano de 2007.

Irradiação Direta		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Brasília	Março	-0,776	-0,782	-0,677	1,292	1,296	1,249
	Junho	-2,534	-2,556	-2,445	2,706	2,726	2,625
	Setembro	-0,652	-0,719	-0,721	1,002	1,048	1,049
Petrolina	Junho	0,282	0,253	0,838	0,860	0,852	1,174
São Martinho da Serra	Março	0,876	0,710	1,147	1,496	1,363	1,740
	Junho	0,749	0,484	0,697	1,268	1,156	1,241
	Setembro	1,946	1,701	1,820	2,684	2,478	2,576
	Dezembro	1,310	1,014	1,945	1,679	1,481	2,196

As simulações no mês de junho apresentaram melhorias nas estações de Petrolina e São Martinho da Serra, ambas utilizando a visibilidade horizontal observada. A estação de Brasília não apresentou melhoria efetiva.

Já nas simulações realizadas no mês de setembro, apenas na estação de São Martinho da Serra foi observada melhoria nos valores estimados. Em dezembro, os valores estimados só foram comparados com dados da estação de São Martinho da Serra, onde as simulações com a visibilidade horizontal atualizada apresentaram diminuição dos valores de viés e RMSE.

As comparações das estimativas de irradiação difusa feitas para o mês de março apresentaram melhorias efetivas apenas na estação de Ourinhos. Porém, é importante mencionar que as simulações das estações de Campo Grande, Petrolina e São Martinho da Serra apresentaram viés e RMSE na mesma ordem das simulações referência. Apenas na estação de Brasília a simulação referência apresentou melhorias isoladamente.

As comparações no mês de junho mostram que as estações de Petrolina e São Luiz não apresentaram melhorias efetivas; mas no caso das estimativas para a segunda, os valores de viés e RMSE das simulações com a visibilidade horizontal observada estiveram na mesma ordem das simulações referência. As simulações com a visibilidade horizontal estimada tiveram melhor desempenho nas estações de Brasília, Campo Grande e Cuiabá, enquanto que as simulações com a visibilidade horizontal observada apresentaram melhores resultados nas estações de Ourinhos e São Martinho da Serra.

Os valores simulados em setembro apresentaram melhorias em todas as cinco estações onde as comparações foram realizadas (Brasília, Campo Grande, Natal, Ourinhos e Palmas). Brasília apresentou resultados da mesma ordem para as simulações com a visibilidade horizontal observada e estimada, enquanto que no restante das comparações foram verificados melhores resultados com a visibilidade horizontal estimada.

Tabela 4.6 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação difusa das simulações realizadas para o ano de 2007.

Irradiação Difusa		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Brasília	Março	-0,097	-0,156	-0,191	0,496	0,511	0,515
	Junho	0,530	0,491	0,463	0,710	0,683	0,662
	Setembro	0,190	0,131	0,136	0,375	0,350	0,353
Campo Grande	Março	-0,008	-0,027	-0,275	0,373	0,389	0,424
	Junho	0,075	0,112	-0,023	0,302	0,336	0,274
	Setembro	-0,428	-0,362	-0,284	0,585	0,563	0,533
	Dezembro	-0,139	-0,172	-0,406	0,502	0,505	0,661
Cuiabá	Junho	0,261	0,328	0,165	0,324	0,388	0,248
	Dezembro	-0,019	-0,083	-0,358	0,512	0,518	0,640
Natal	Setembro	0,500	0,396	0,039	0,722	0,652	0,506
Ourinhos	Março	0,280	0,243	0,073	0,679	0,666	0,602
	Junho	-0,007	-0,004	-0,083	0,241	0,249	0,246
	Setembro	-0,125	-0,138	-0,120	0,406	0,416	0,412
	Dezembro	0,162	0,104	-0,070	0,406	0,385	0,405
Palmas	Setembro	0,342	0,286	0,345	0,419	0,376	0,425
	Dezembro	-0,001	-0,069	-0,277	0,492	0,495	0,617
Petrolina	Março	-0,052	-0,120	-0,218	0,459	0,468	0,462
	Junho	-0,208	-0,250	-0,417	0,473	0,495	0,562
São Luiz	Junho	-0,695	-0,704	-1,136	1,114	1,118	1,455
	Dezembro	0,018	-0,020	-0,431	0,309	0,306	0,631
São Martinho da Serra	Março	-0,337	-0,360	-0,469	0,522	0,533	0,628
	Junho	-0,023	-0,003	-0,045	0,295	0,290	0,297
	Dezembro	-0,133	-0,133	-0,429	0,651	0,679	0,719

Já as comparações realizadas nas simulações do mês de dezembro mostraram melhorias nos resultados das estimativas feitas para as estações de Ourinhos (utilizando visibilidade horizontal estimada) e São Luiz (utilizando visibilidade horizontal observada), enquanto que Palmas e São Martinho da Serra apresentaram viés e RMSE na mesma ordem das simulações de referência.

4.6.3. Avaliação das simulações de 2008

4.6.3.1. Março

A figura 4.77 apresenta gráficos de correlação entre os dados de irradiação global diária modelada e a irradiação global diária observada em dez estações no território brasileiro.

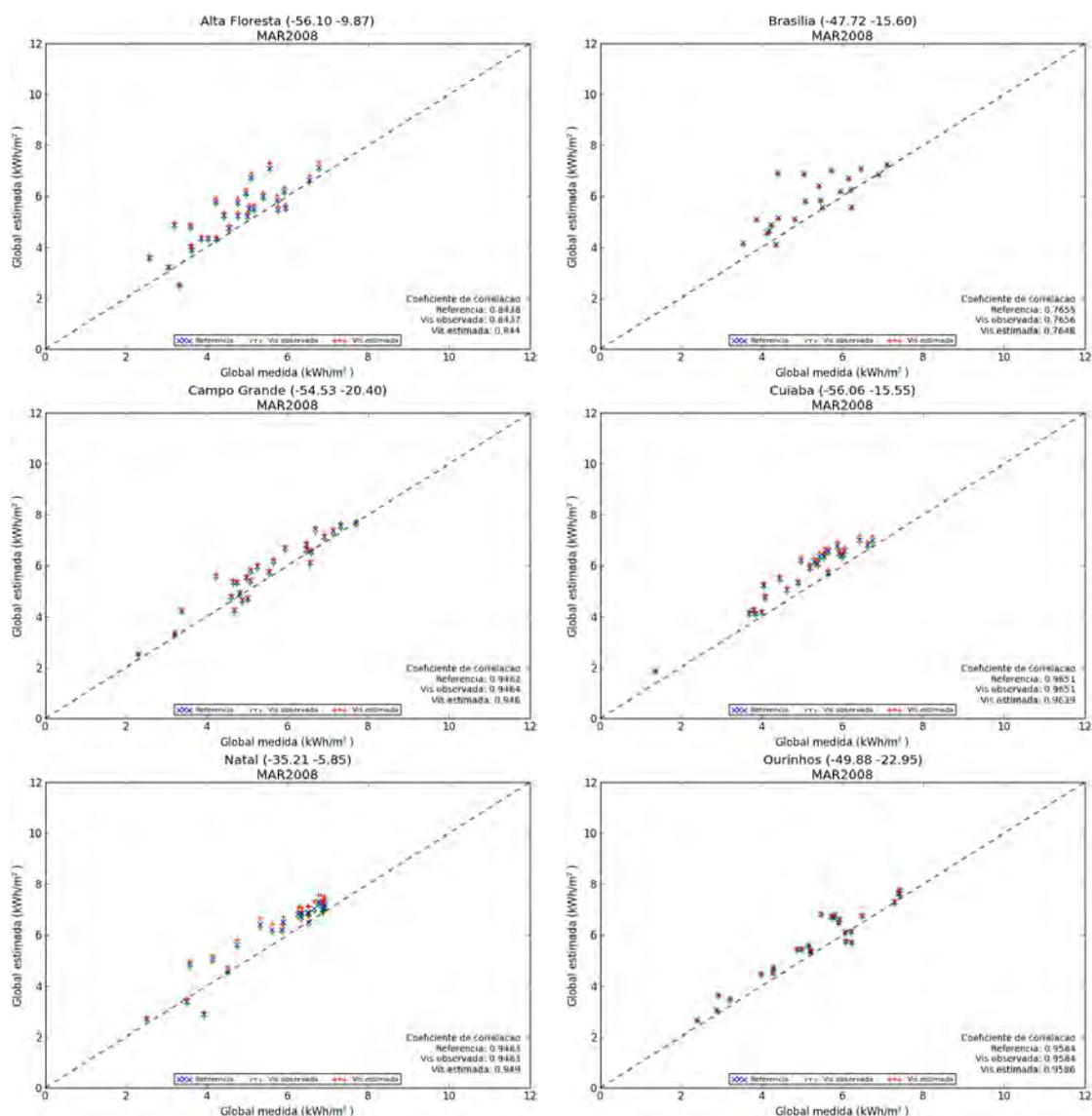
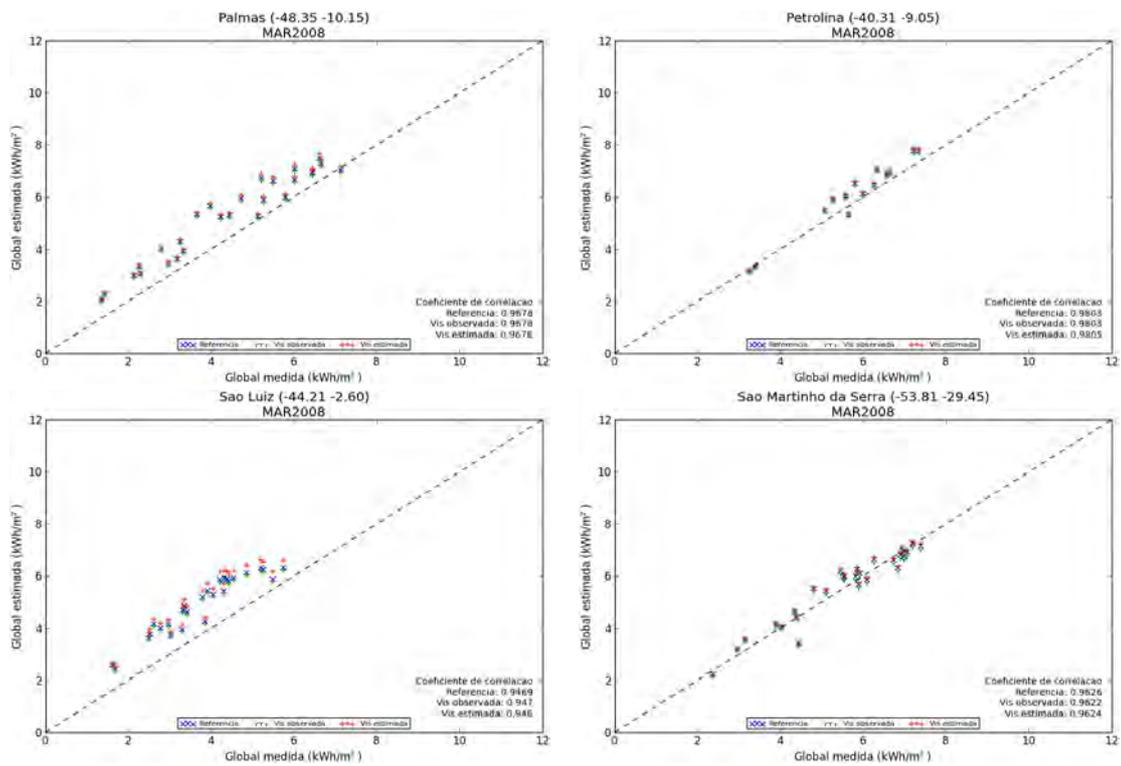


Figura 4.77 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.77.

Com exceção de Alta Floresta e Brasília, que apresentaram correlação de 0,84 e 0,76, todas as estações apresentaram correlações acima de 0,94. Os gráficos com os valores diários de irradiação global estimada e medida no mês de março de 2008 são apresentados na figura 4.78, e juntamente com os gráficos de dispersão, observa-se a tendência do modelo BRASIL-SR em superestimar as estimativas.

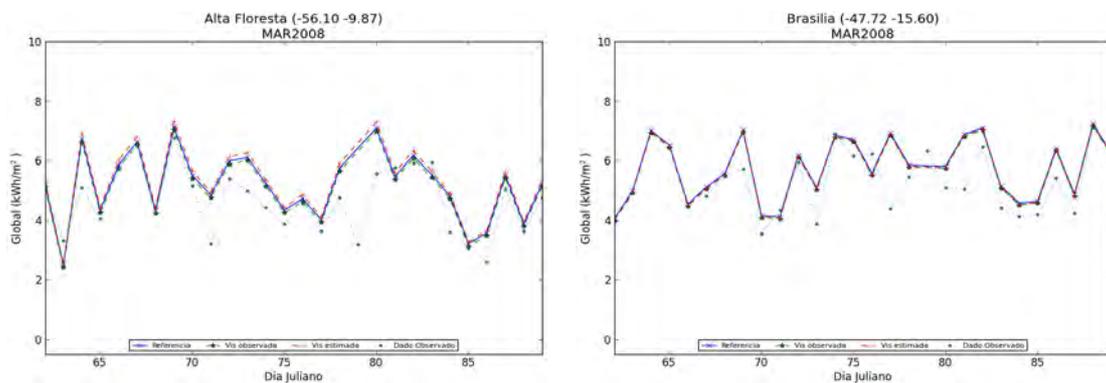
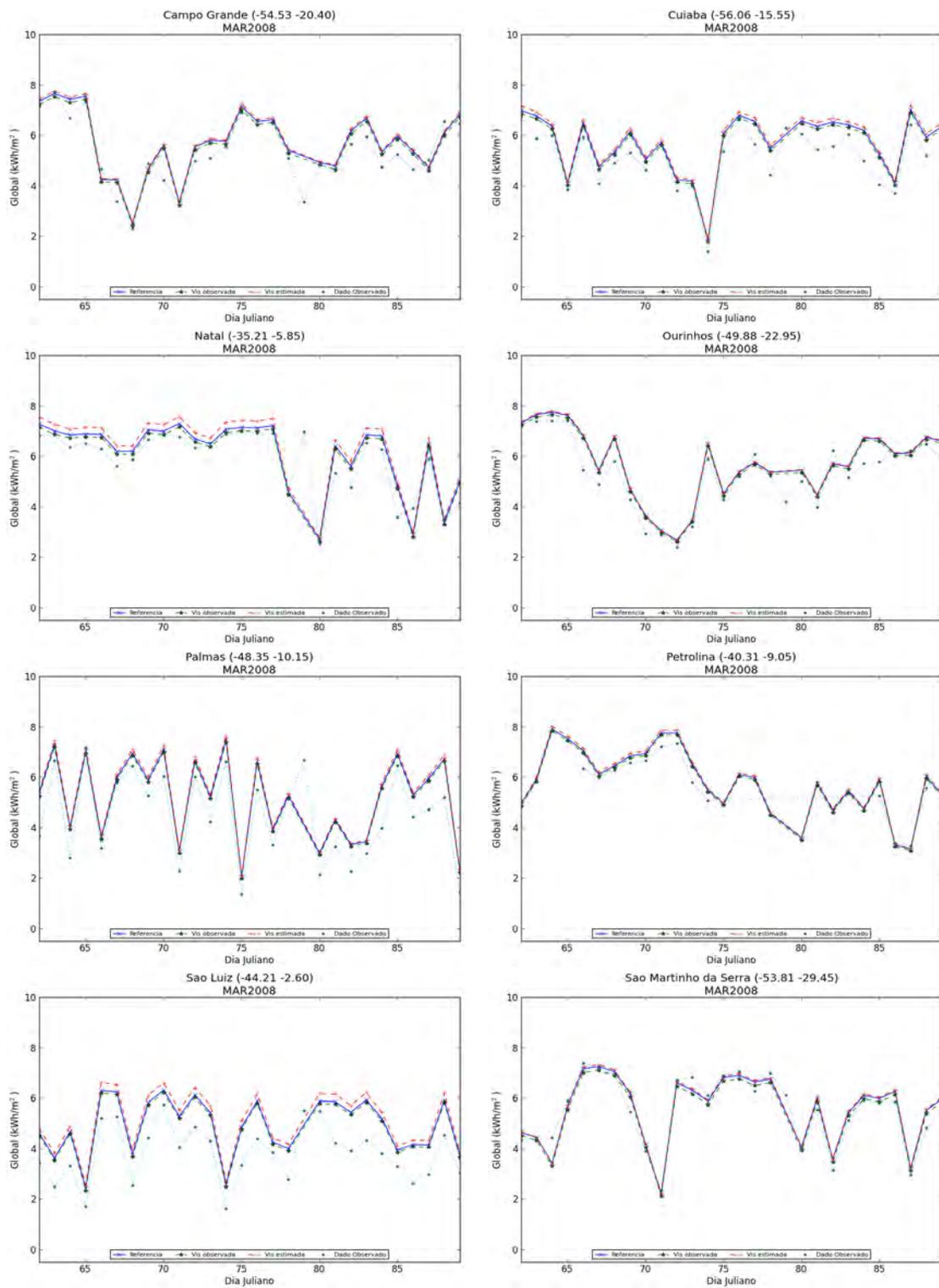


Figura 4.78 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.78.

As estimativas de irradiação direta estimada foram avaliadas com dados das estações de Petrolina e São Martinho da Serra, e os gráficos de dispersão e valores diários são apresentados na figura 4.79. As correlações observadas foram da ordem de 0,98 e 0,95.

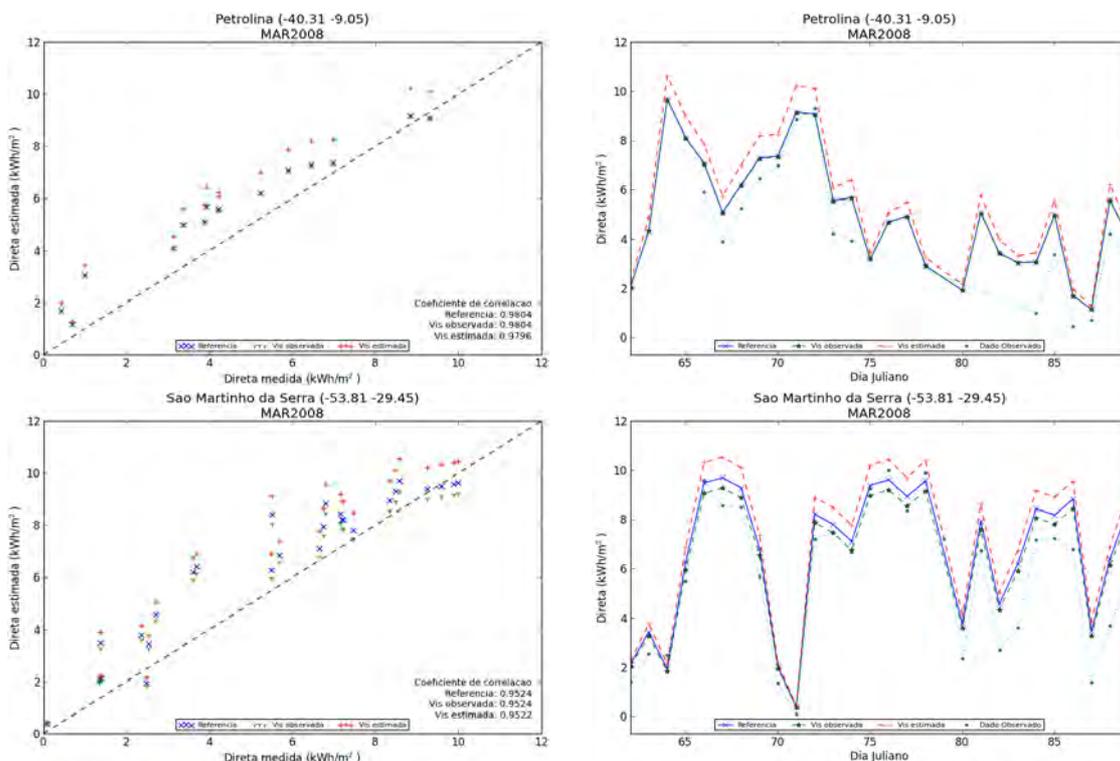


Figura 4.79 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de março de 2008, nas estações de Petrolina e São Martinho da Serra.

Na figura 4.80 são apresentados os gráficos de correlação entre os dados de irradiação difusa diária modelada nas três simulações e a irradiação difusa diária observada.

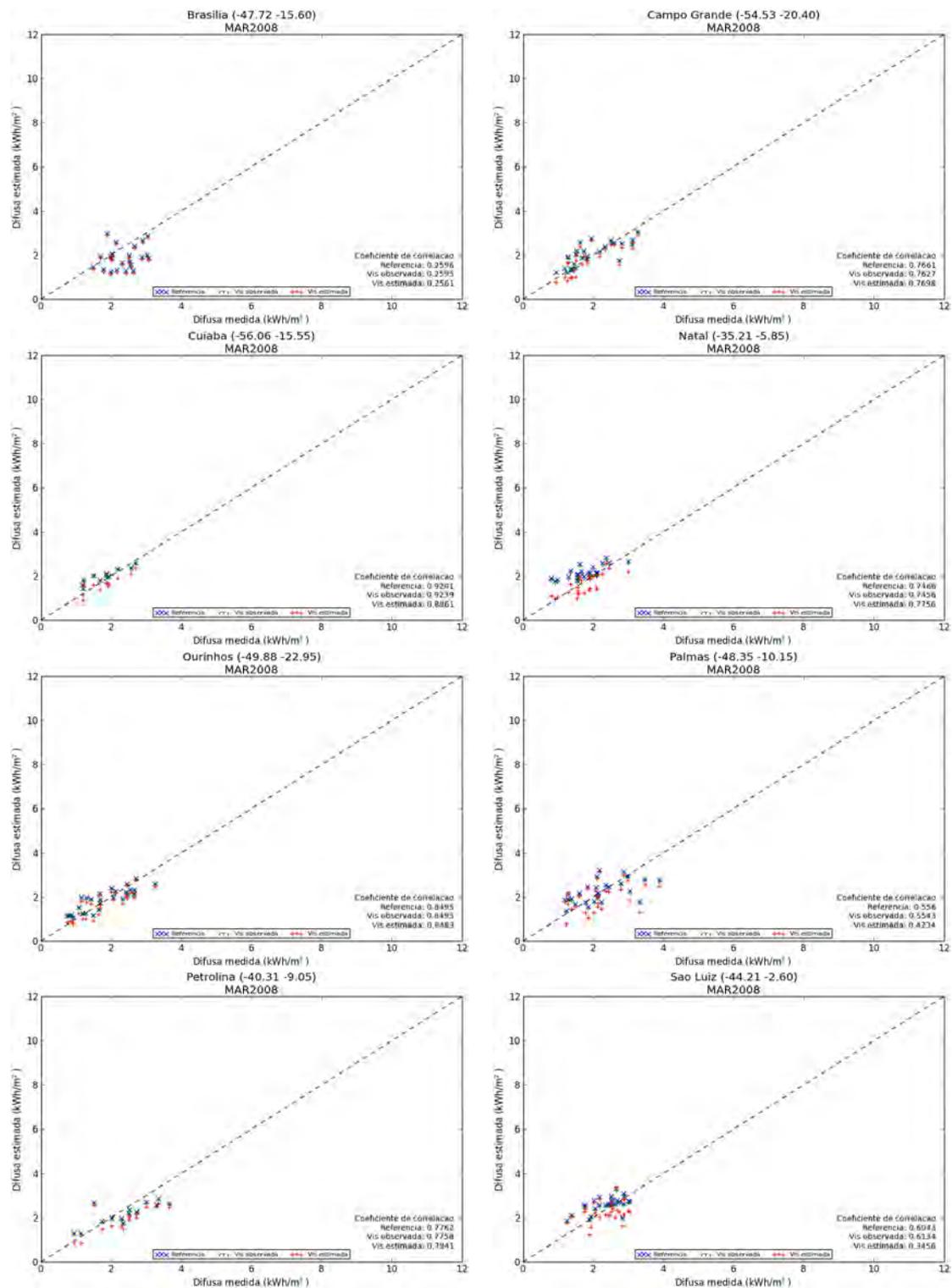
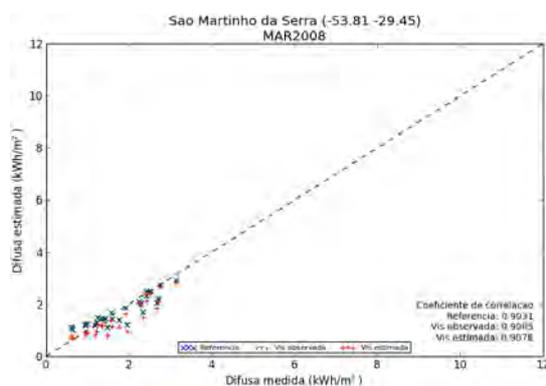


Figura 4.80 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.80.

Assim como verificado nos anos de 2006 e 2007, as correlações foram menores que as observadas entre estimativas e medidas de irradiação global, sendo, desta vez, a estação de Brasília aquela com menor valor (0,25). As maiores correlações foram verificadas nas estações de Cuiabá e São Martinho da Serra, com valores de 0,92 e 0,90, respectivamente.

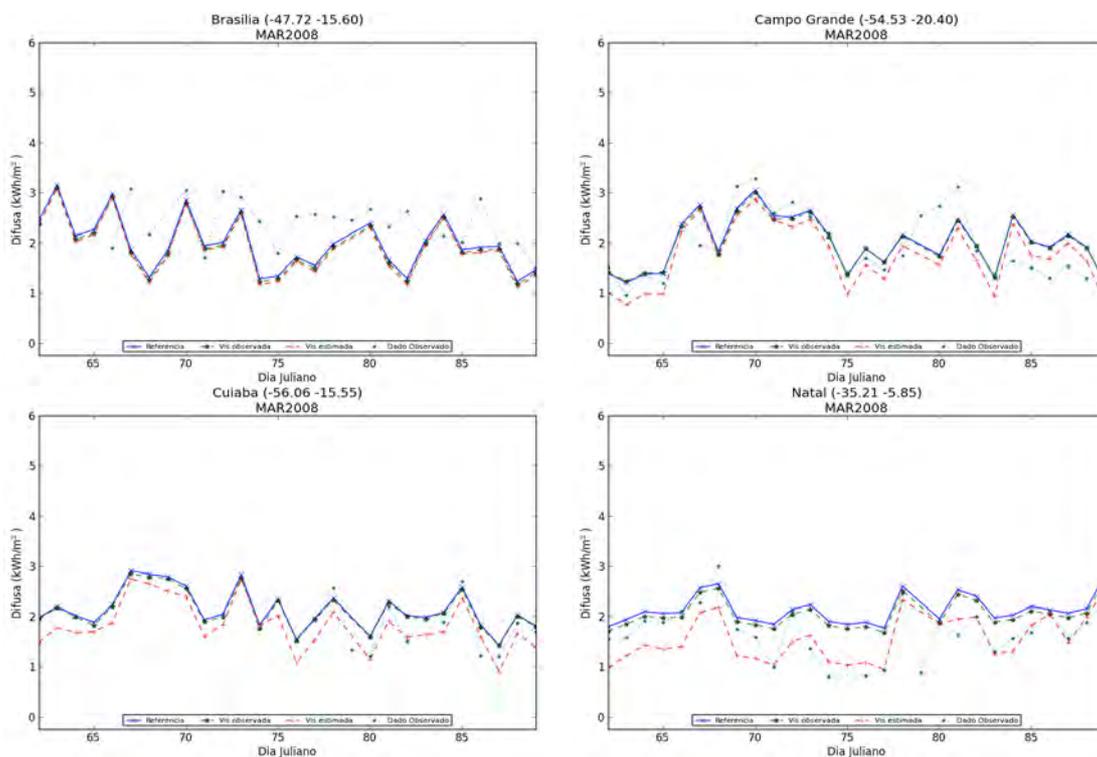
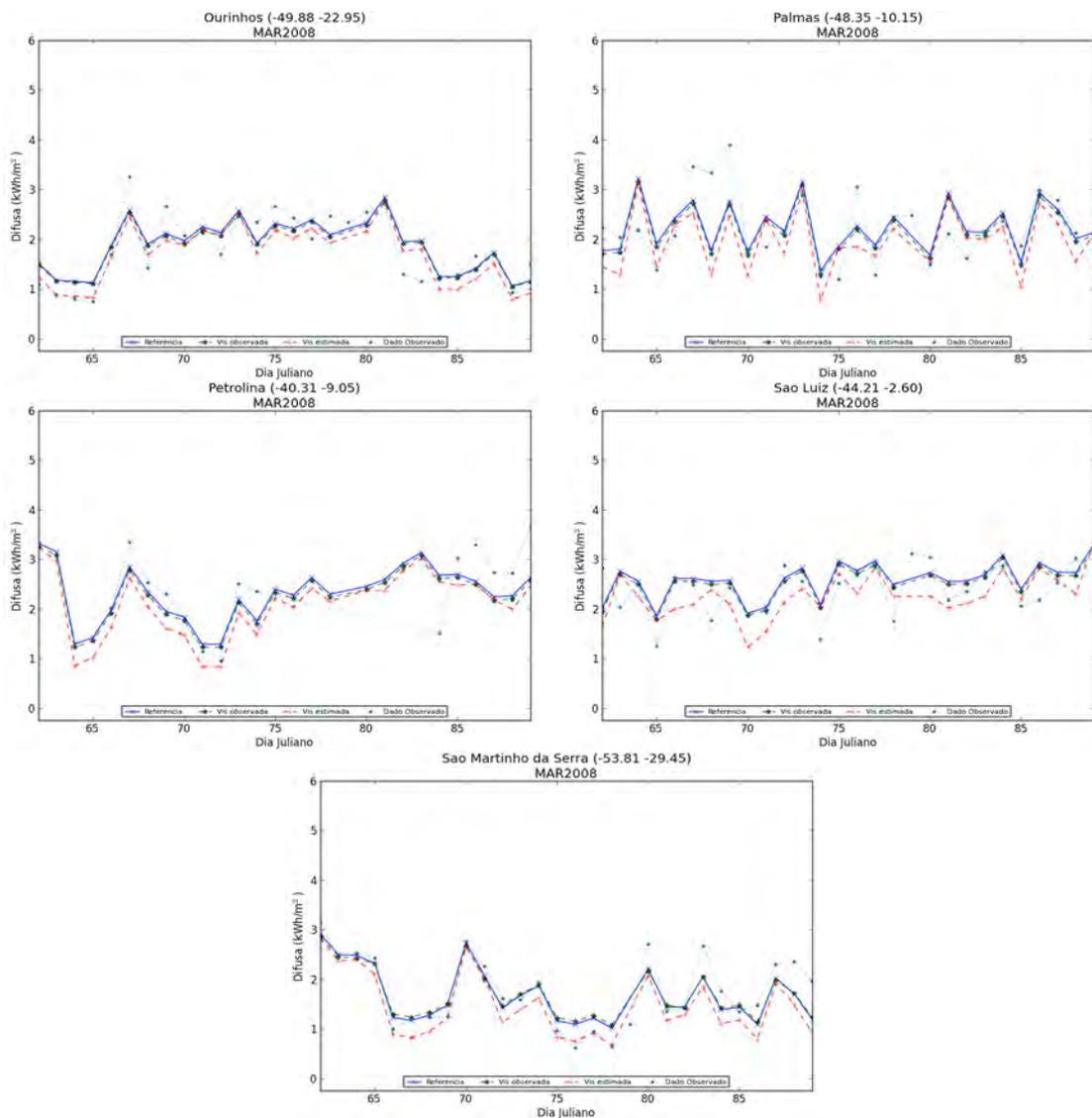


Figura 4.81 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de março de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Natal, Ourinhos, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.81.

4.6.3.2. Junho

As figuras 4.82 e 4.83 apresentam os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida e valores diários no mês de junho de 2008. Destaca-se a baixa correlação dos dados das estações de Alta Floresta e Palmas, da ordem de 0,35 e 0,38, com pequenas melhorias nos valores das simulações que utilizaram a visibilidade horizontal estimada. As demais estações apresentaram bons valores de correlação.

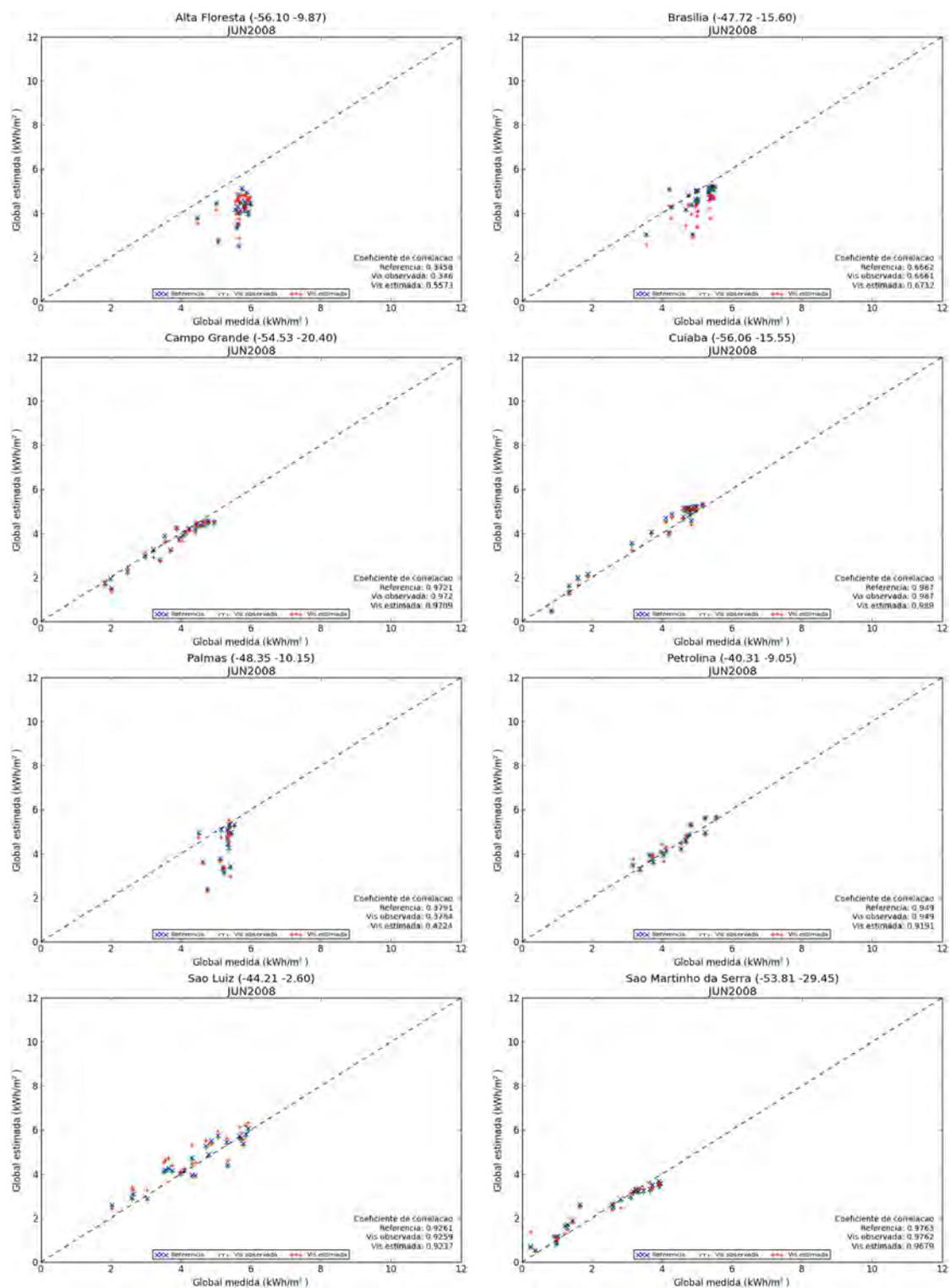


Figura 4.82 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

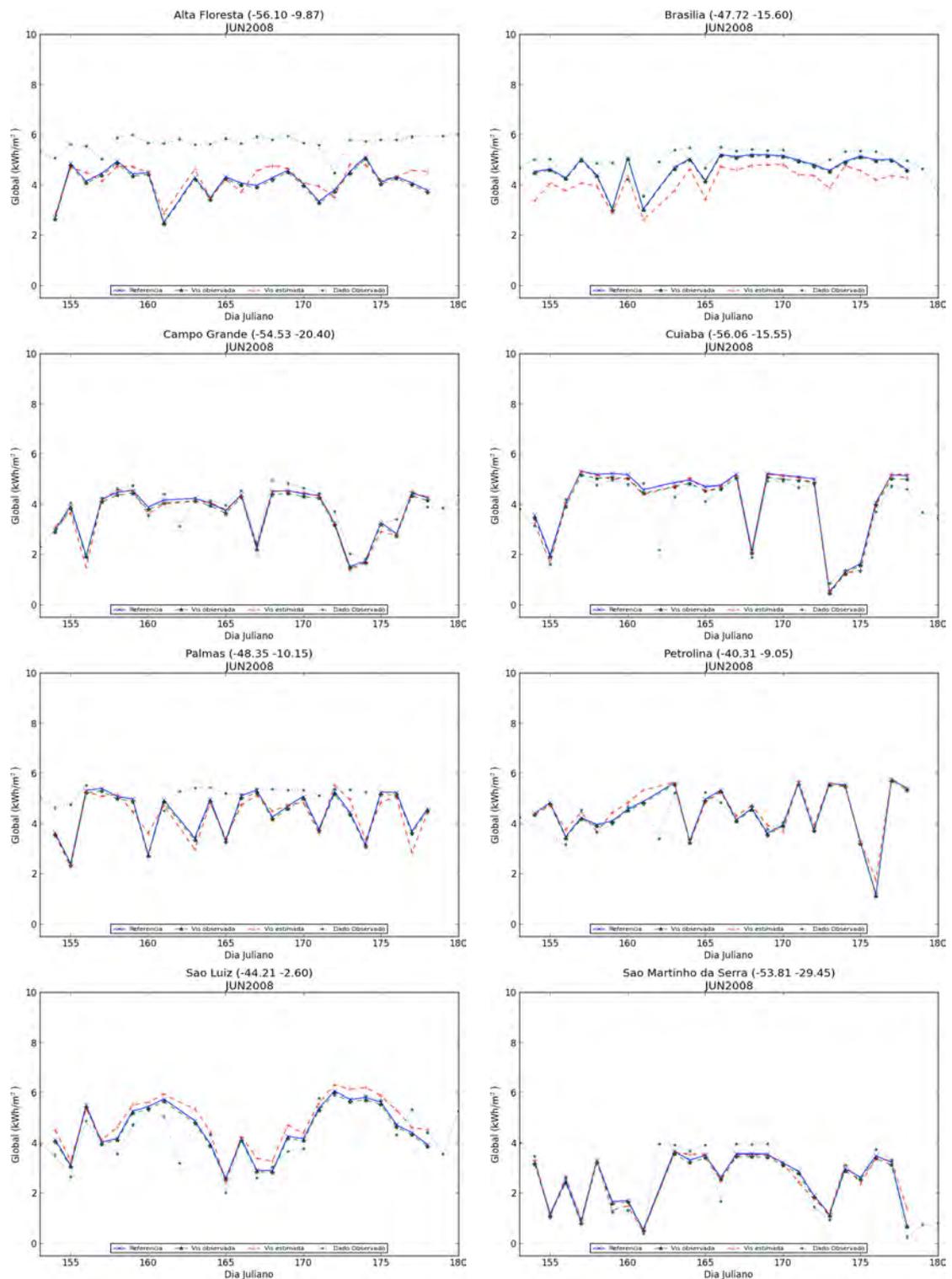


Figura 4.83 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

As estimativas de irradiação direta para as estações de foram avaliadas com dados das estações de Brasília, Petrolina e São Martinho da Serra, e os gráficos de dispersão e valores diários são apresentados na figura 4.84. Observa-se a boa correlação entre os dados medidos e estimados (acima de 0,8) e a tendência de subestimativa do modelo na estação de Brasília, em especial nas simulações que utilizaram a visibilidade horizontal estimada. Nas demais estações, o modelo superestimou os valores.

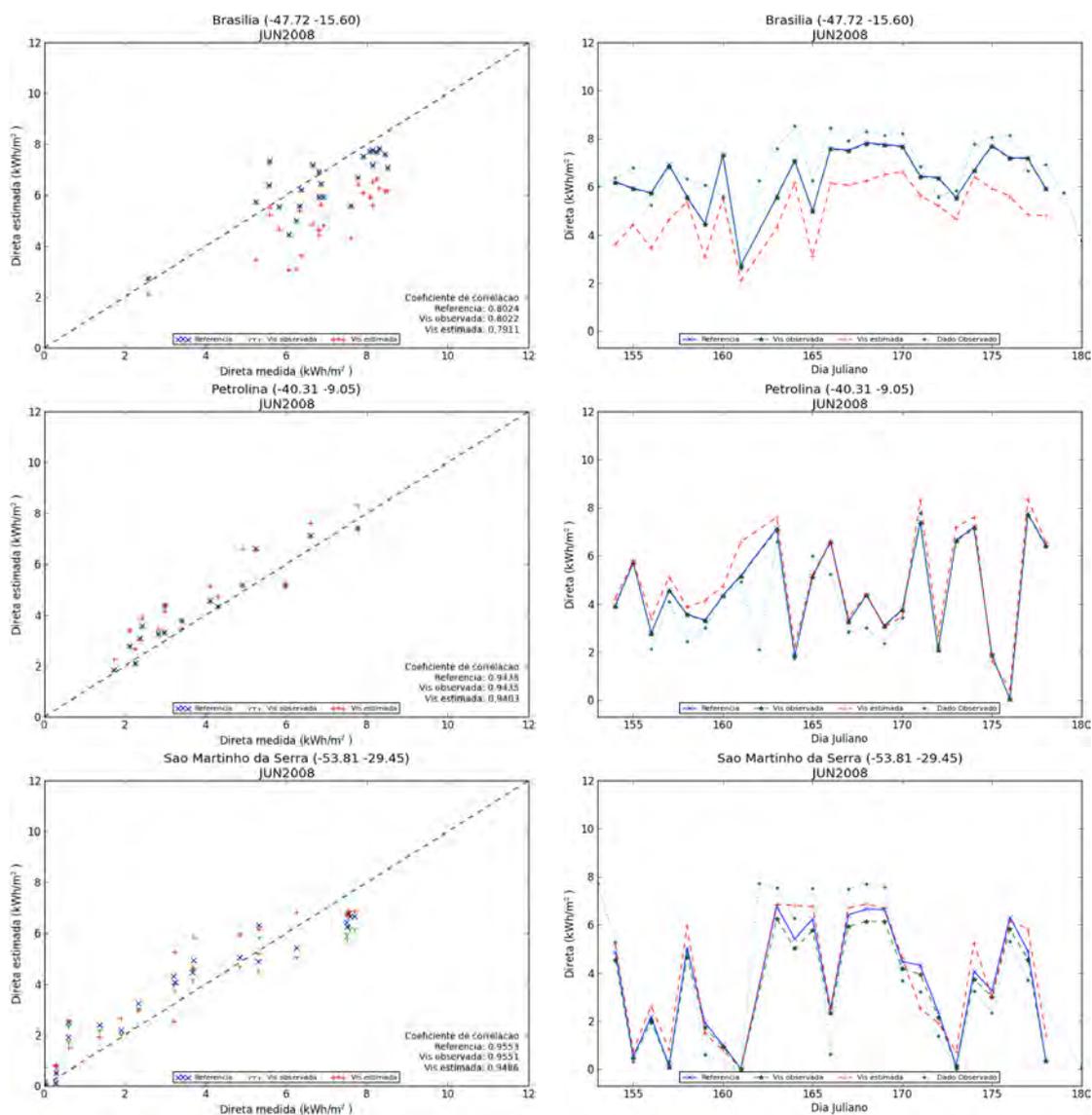


Figura 4.84 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2008, nas estações de Brasília, Florianópolis e São Martinho da Serra.

A figura 4.85 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação difusa estimada e irradiação difusa medida no mês de junho de 2008. As maiores correlações foram observadas nas estações de Campo Grande, Cuiabá e São Martinho da Serra, com as duas primeiras apresentando melhoria na correlação das simulações com visibilidade horizontal estimada.

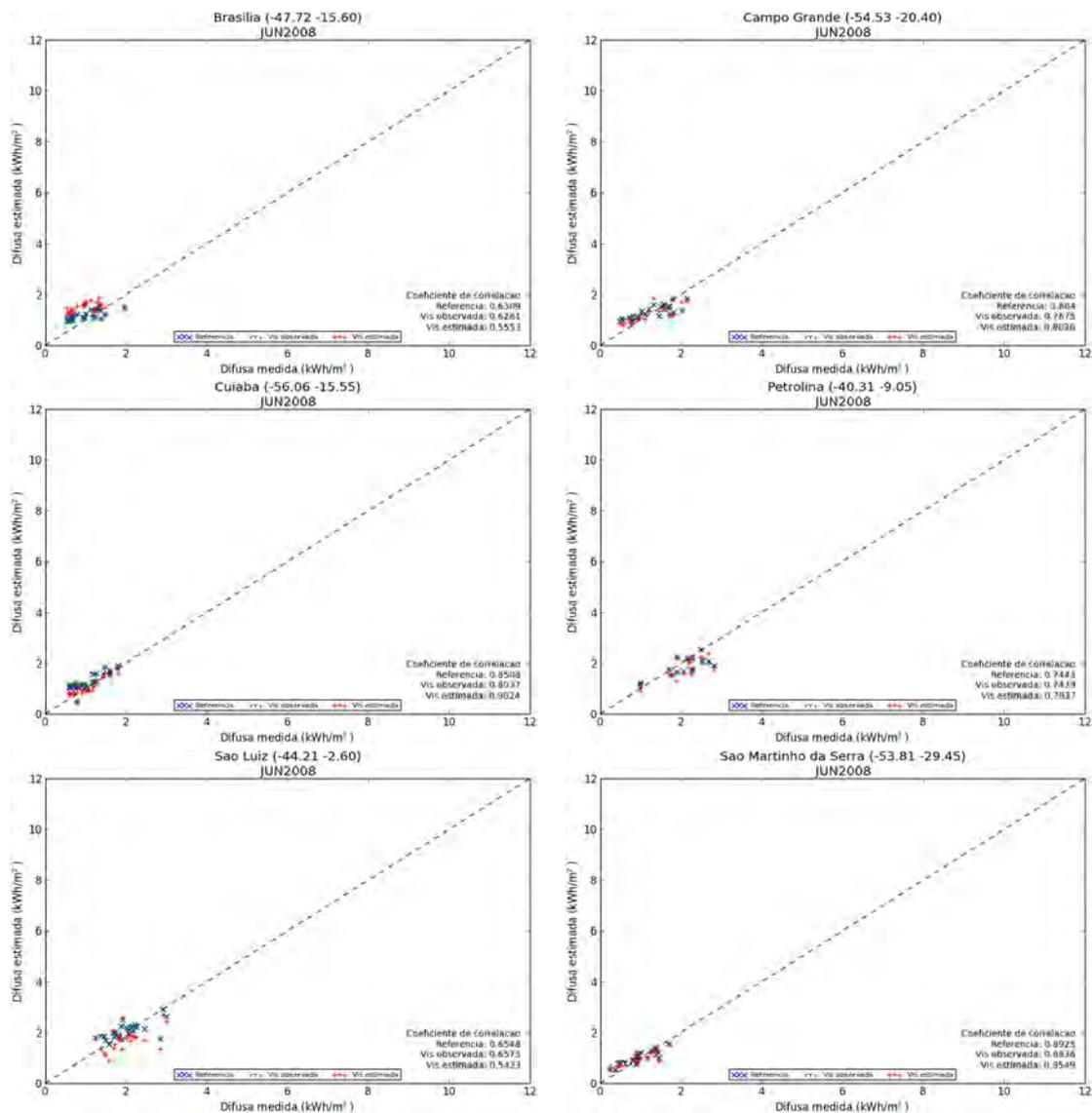


Figura 4.85 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

A menor correlação foi observada na estação de Brasília, mas com valores que chegaram a 0,55 (visibilidade horizontal estimada).

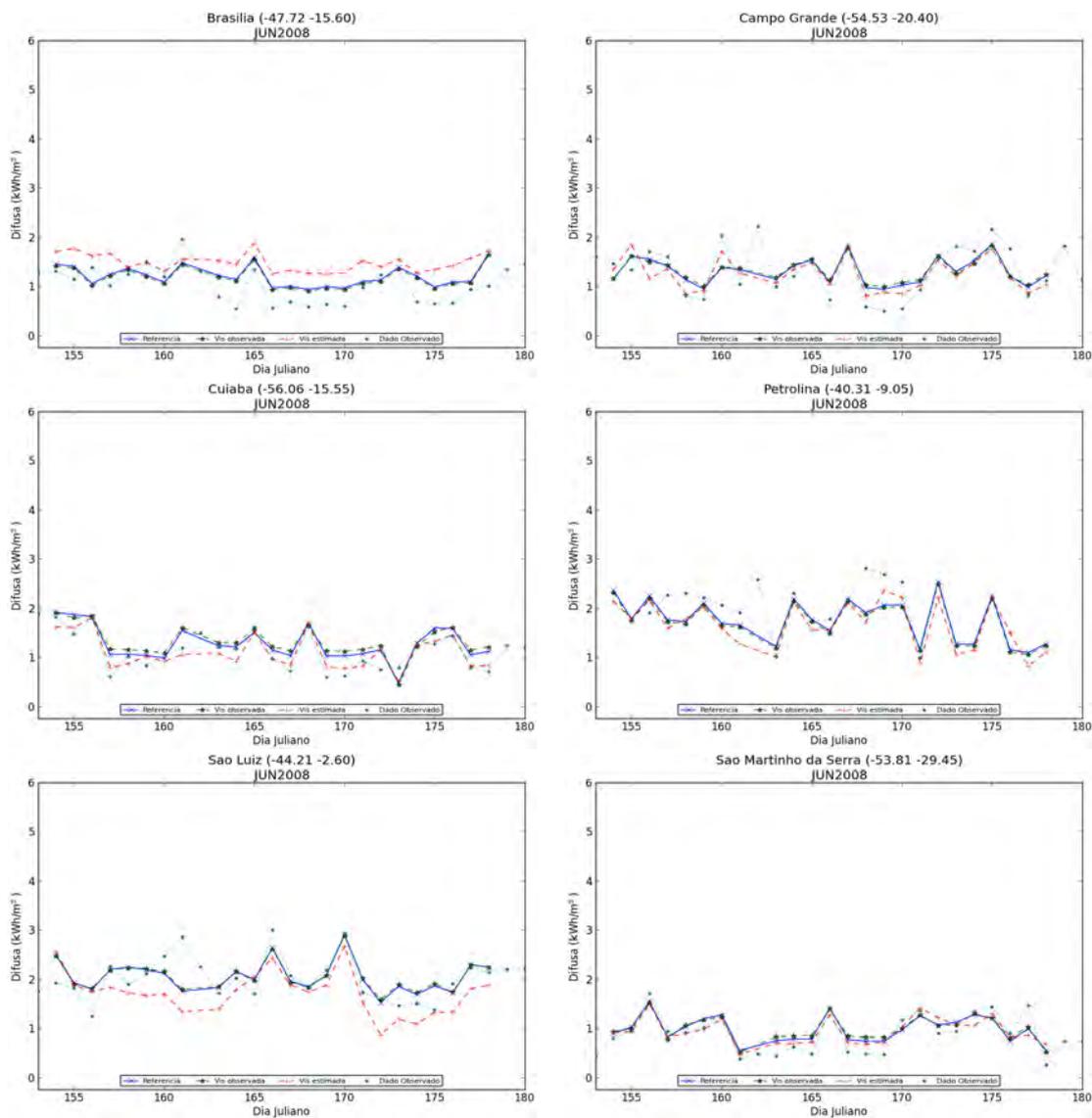


Figura 4.86 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de junho de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

4.6.3.3. Setembro

Os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de setembro de 2008 são apresentados na figura 4.87. As menores correlações neste mês foram verificadas nas estações de Palmas e São Luiz, da ordem de 0,6 e 0,7, respectivamente. As demais estações apresentaram correlações acima de 0,91. Os valores totais são apresentados na figura 4.88 e juntamente com os gráficos de correlação, mostram que o modelo tendeu a superestimar a irradiação global (exceto na estação de São Luiz).

Os dados de irradiação direta estimada e irradiação direta medida nas estações de Brasília, Petrolina e São Martinho da Serra podem ser observados na figura 4.89, onde se verifica uma boa correlação entre eles. O modelo BRASIL-SR tendeu a superestimar os valores reais. Os gráficos de correlação entre os dados estimados e medidos de irradiação difusa, assim como os valores diários, são observados nas figuras 4.90 e 4.91, respectivamente.

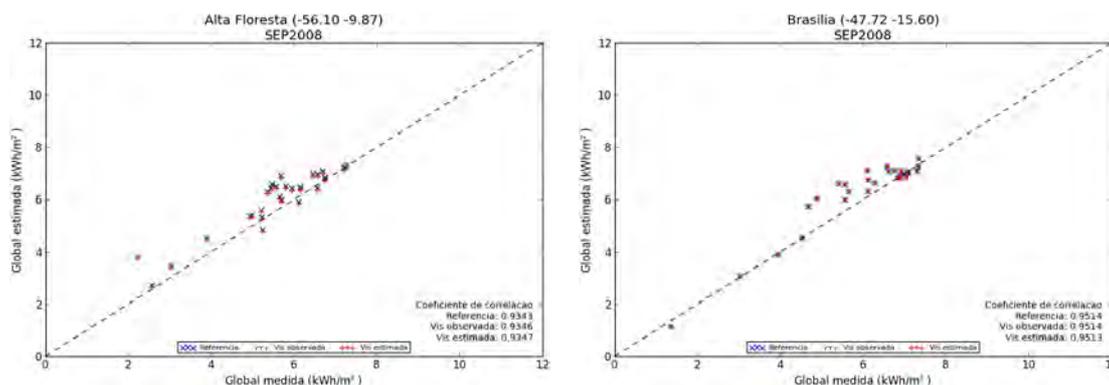
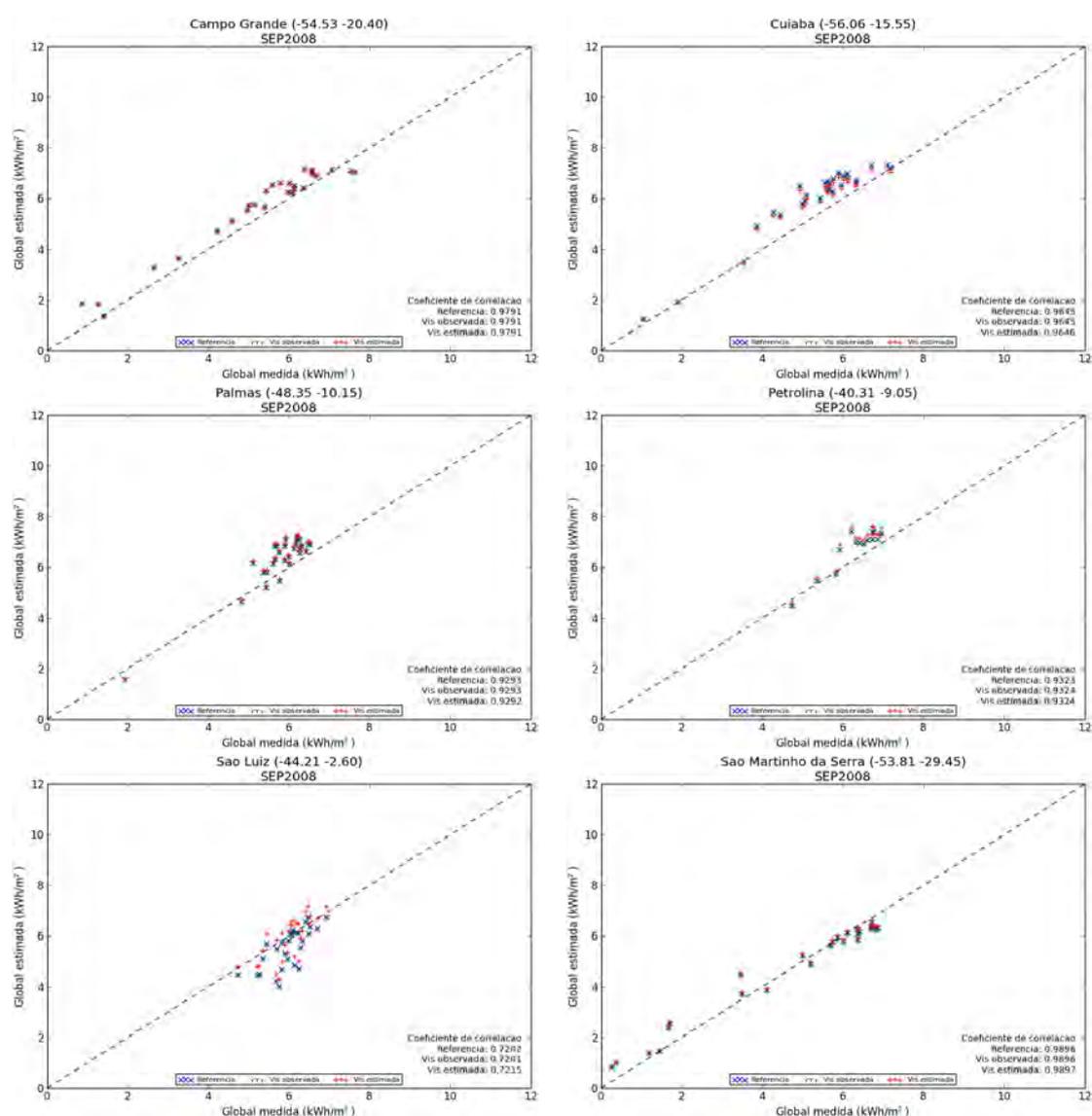


Figura 4.87 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.87.

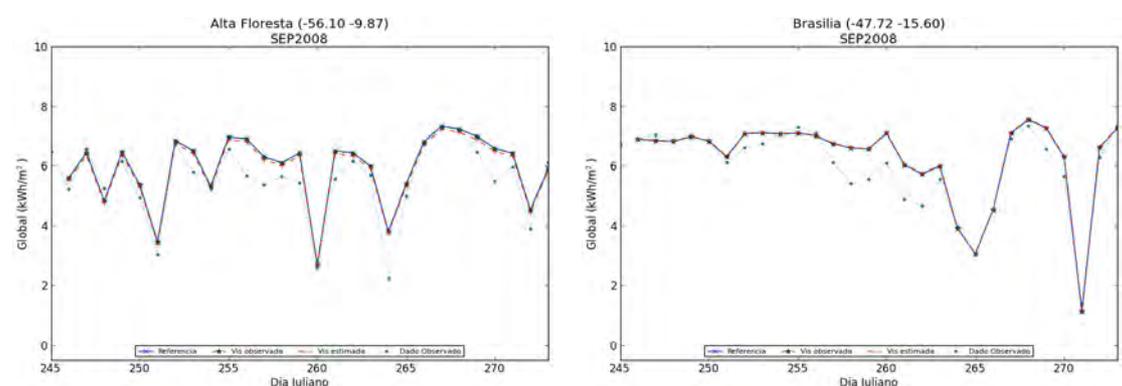
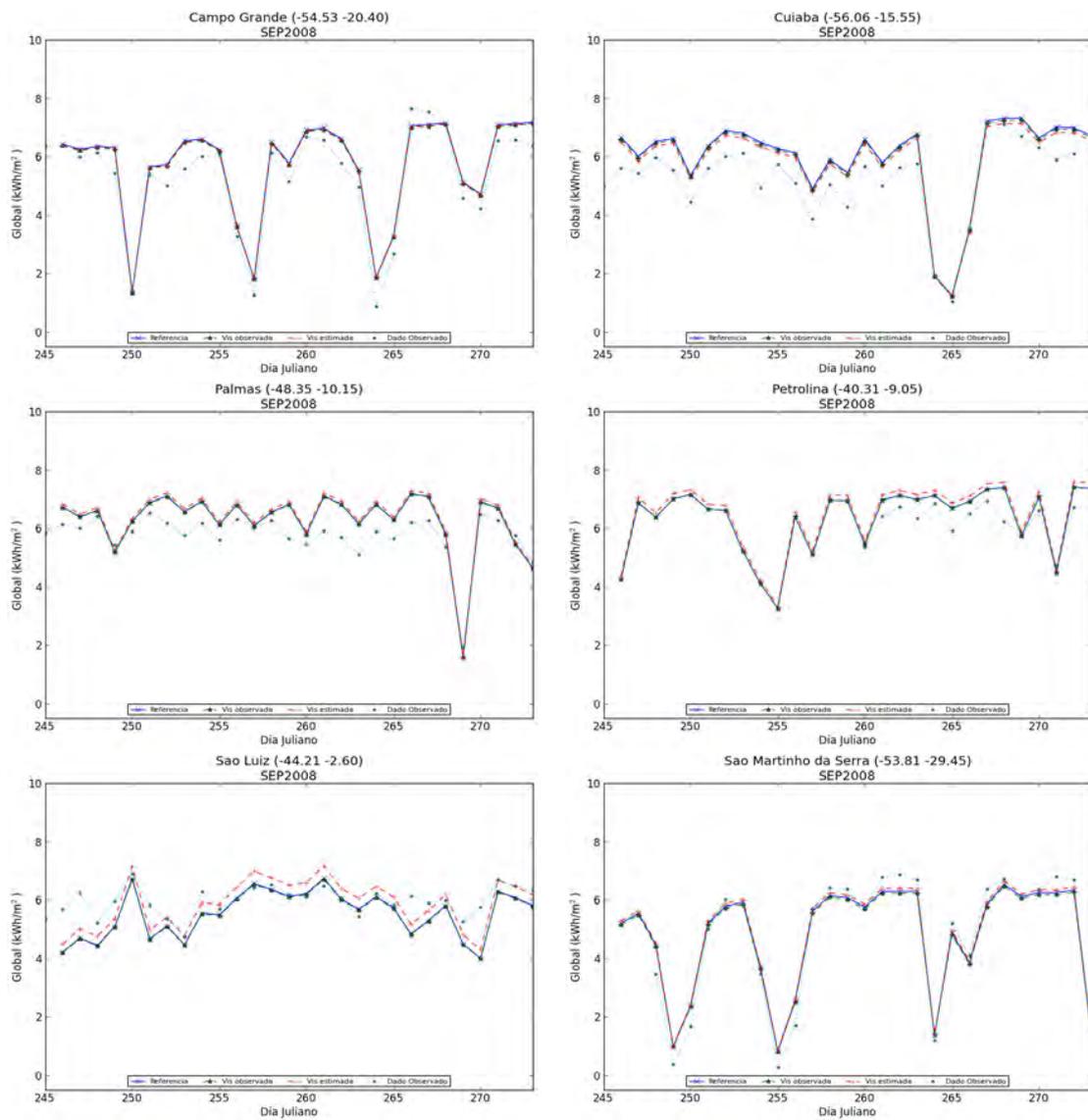


Figura 4.88 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.88.

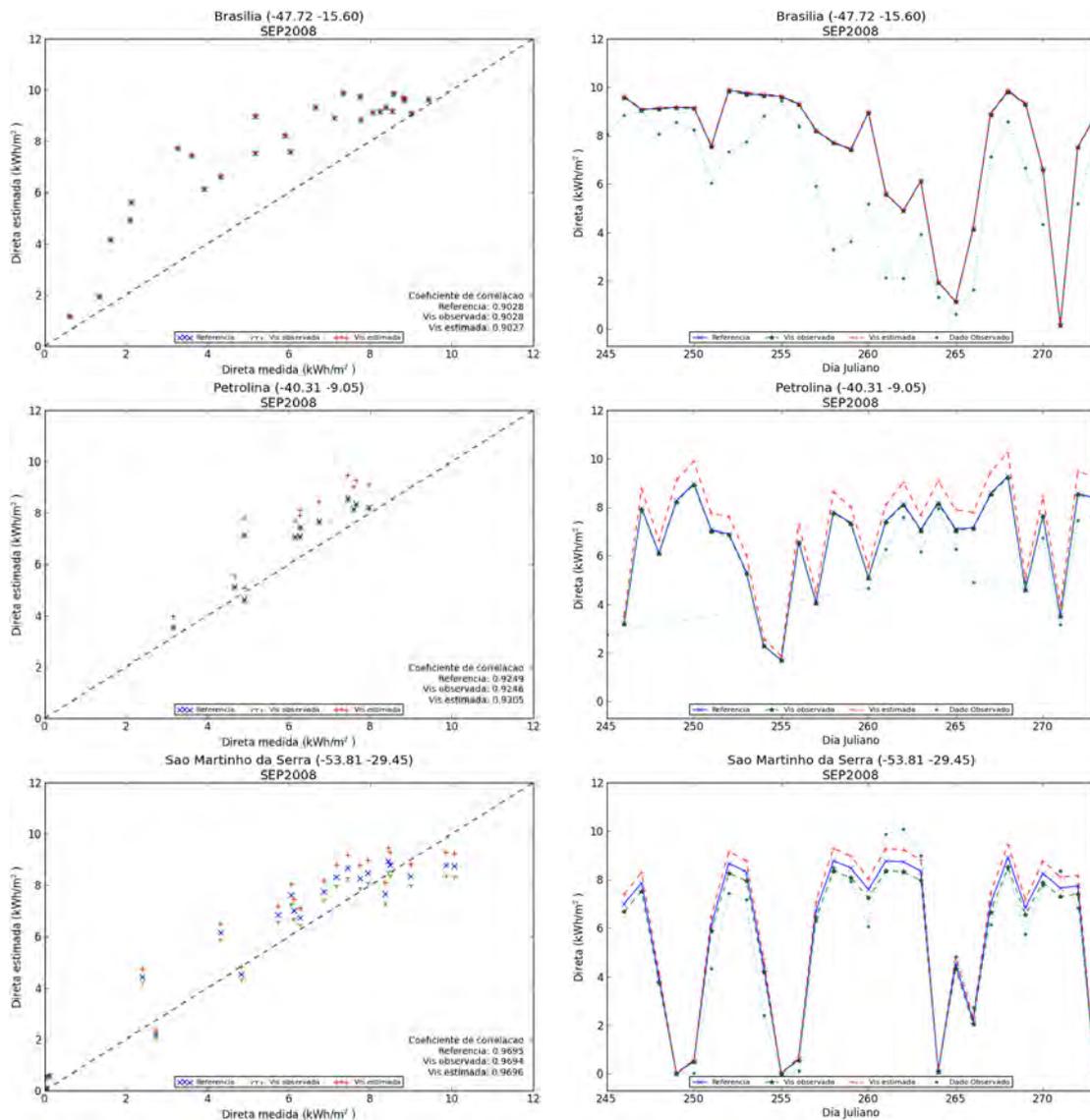


Figura 4.89 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Brasília, Petrolina e São Martinho da Serra.

Analisando os dados de irradiação difusa estimados e os dados medidos no mês de setembro, verifica-se que apenas a estação de Brasília apresentou correlação acima de 0,82.

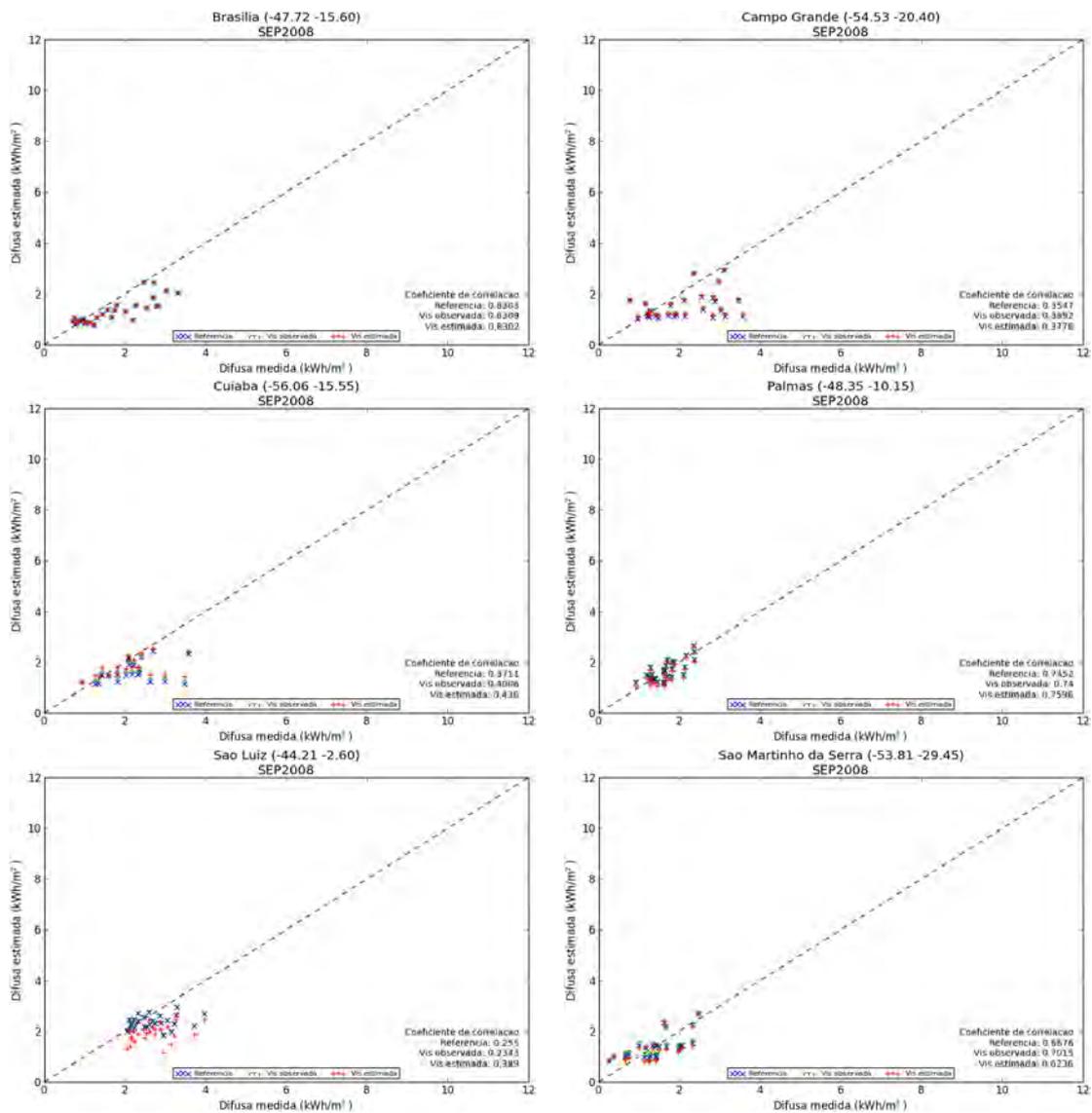


Figura 4.90 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.

As demais estações (Campo Grande, Cuiabá, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra) apresentaram correlações abaixo de 0,7, sendo São Luiz aquela com os menores valores (atingindo 0,23); porém, há uma pequena melhora na correlação das estimativas realizadas com os valores de visibilidade horizontal estimada. Verificou-se a tendência do modelo de subestimar os valores medidos.

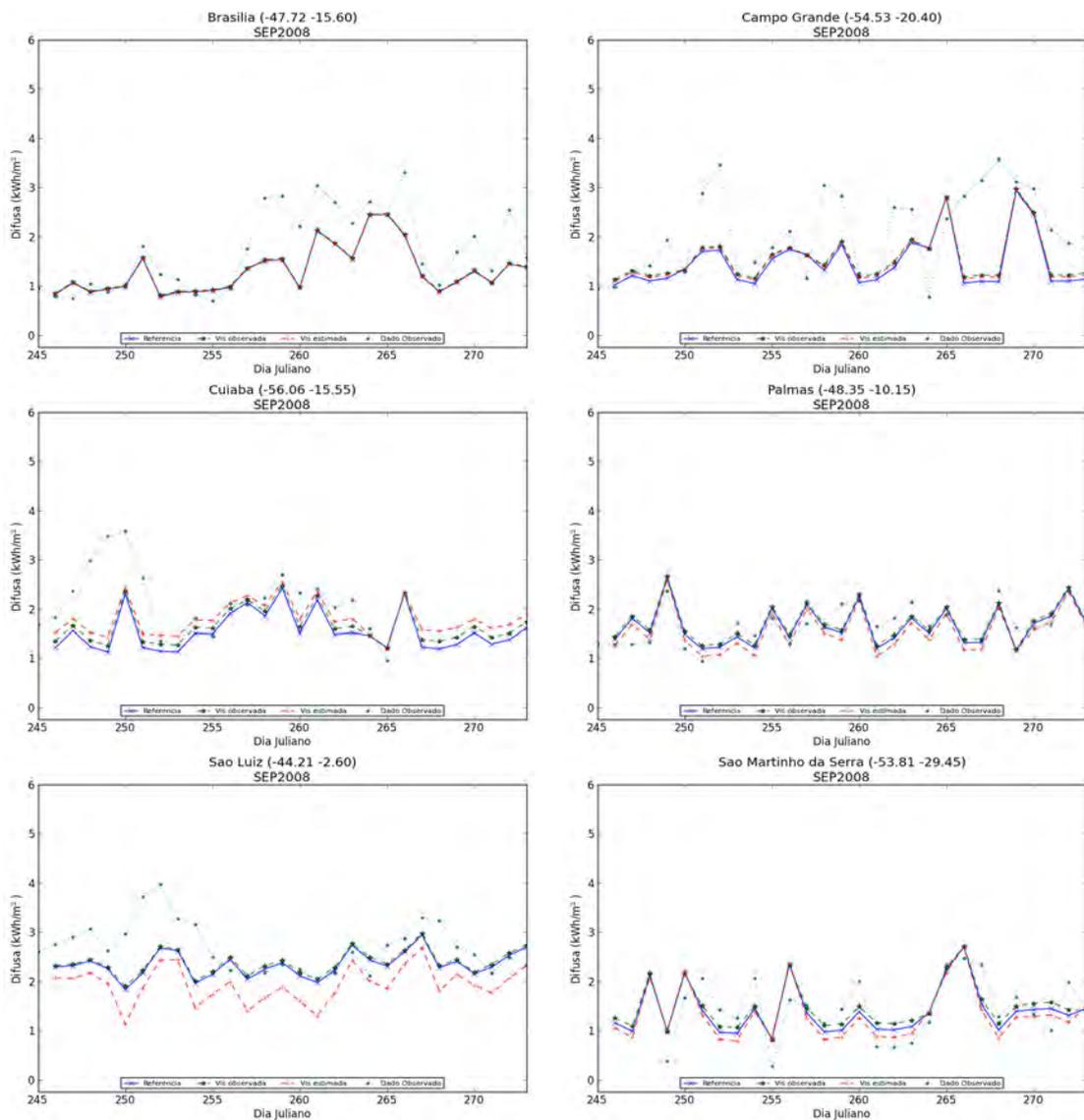


Figura 4.91 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de setembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas, São Luiz e São Martinho da Serra.

4.6.3.4. Dezembro

A figura 4.92 apresenta os gráficos de correlação entre dos dados de irradiação global estimada e irradiação global medida no mês de dezembro de 2008. Assim como nos anos anteriores, dezembro apresenta boa correlação em

todas as estações, mas o modelo tende a superestimar os valores simulados. Os valores diários são apresentados na figura 4.93.

A correlação e os valores diários das estimativas e dos dados medidos de irradiação direta nas estações de Petrolina e São Martinho da Serra são apresentados na figura 4.94; mais uma vez, com boa correlação entre eles. Assim como nos anos anteriores, há a tendência do modelo em superestimar estes valores.

Já os valores de correlação entre os dados de irradiação difusa estimados e medidos e os valores diários, são apresentados nas figuras 4.92 e 4.93. A menor correlação foi verificada estação de Petrolina, da ordem de 0,64; a maior, de 0,84, foi verificada na estação de São Martinho da Serra. O modelo tendeu a subestimar os valores reais na grande maioria das simulações.

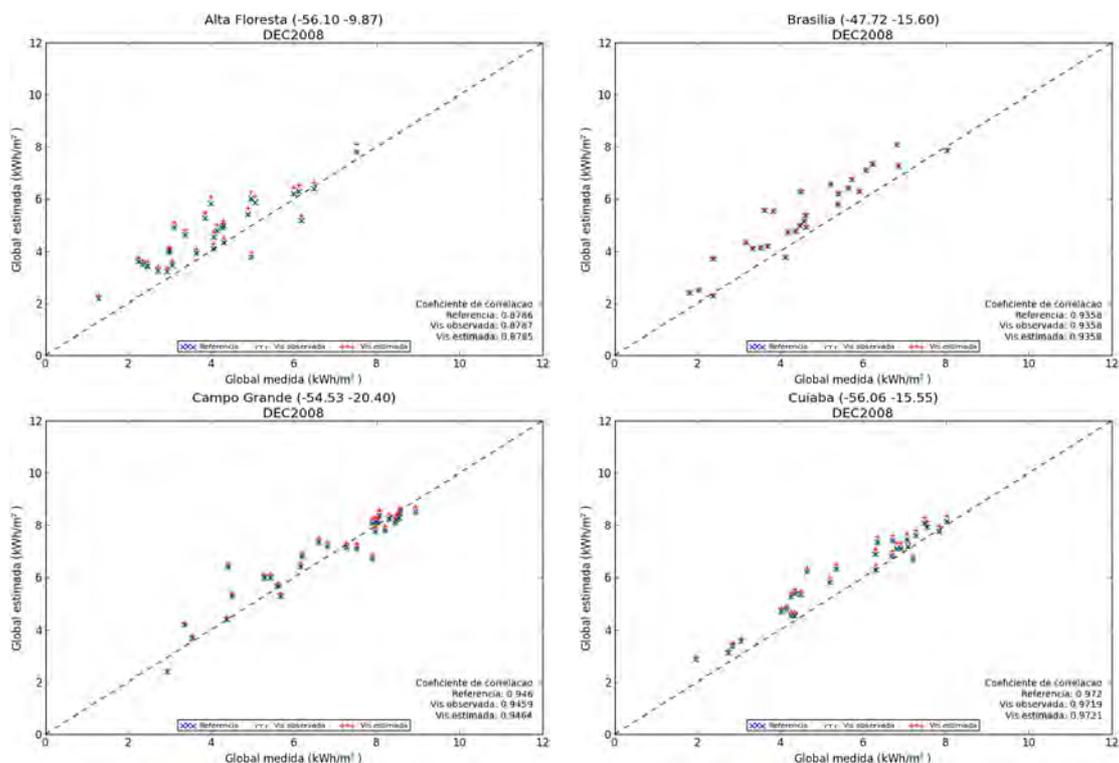
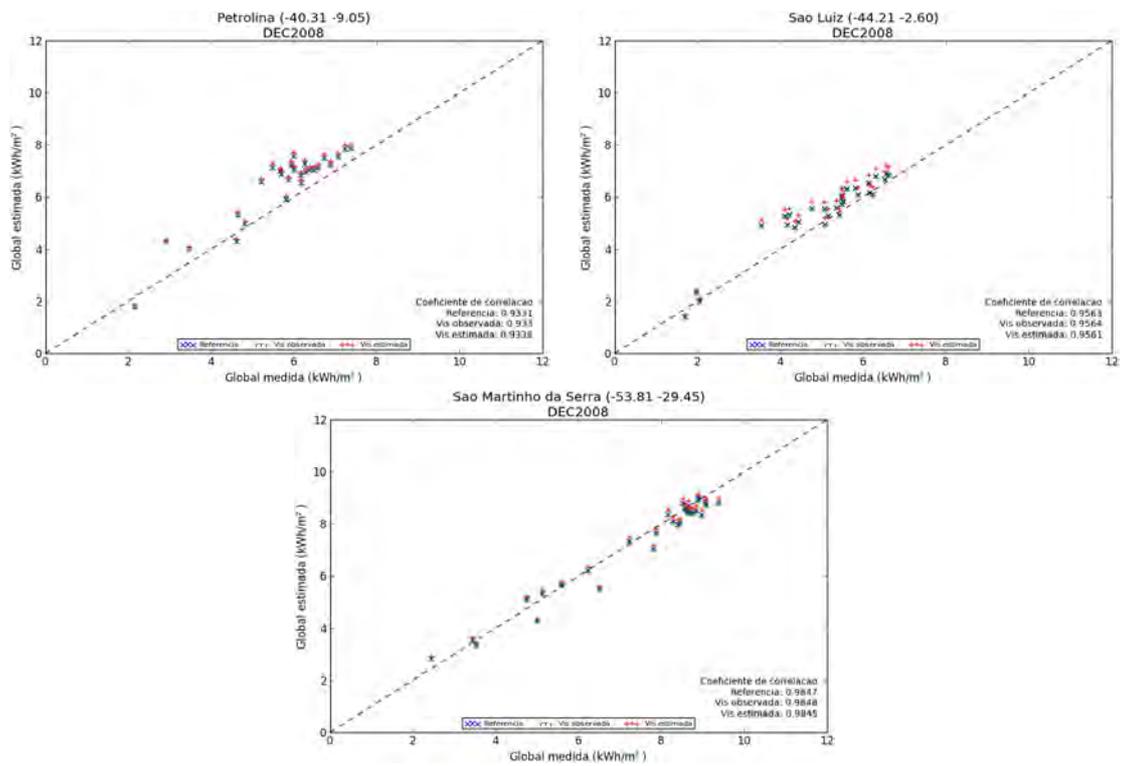


Figura 4.92 – Correlação entre a irradiação global diária estimada e a irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.91.

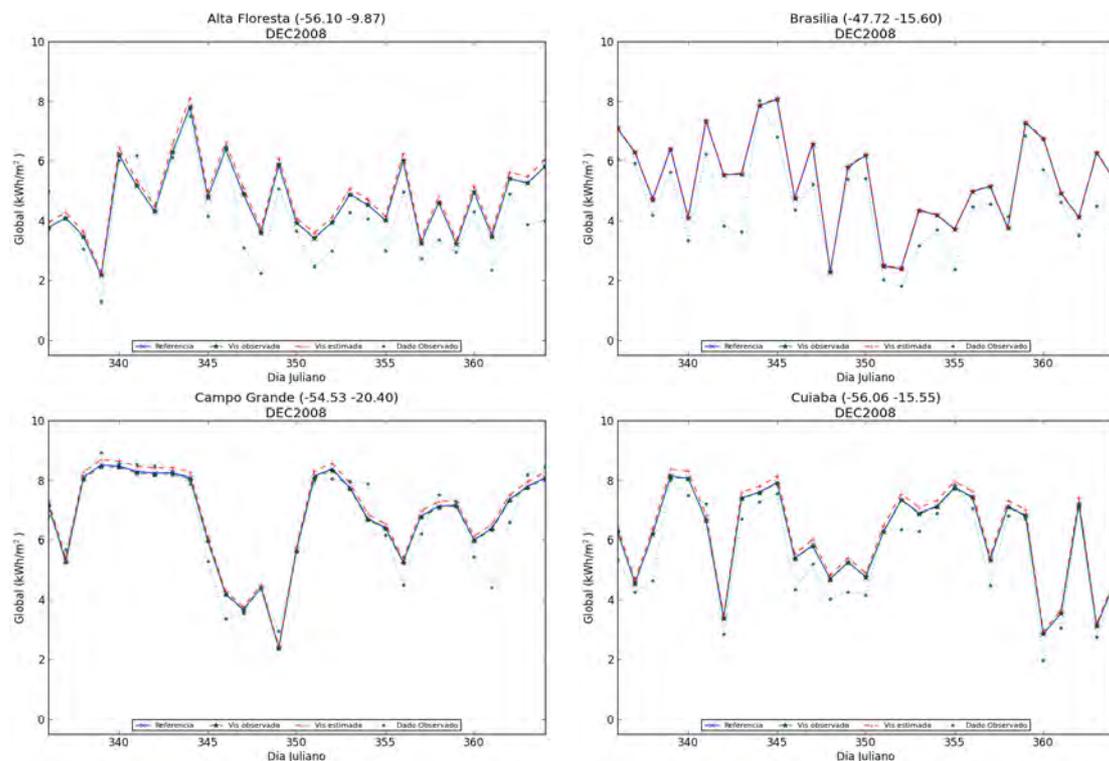
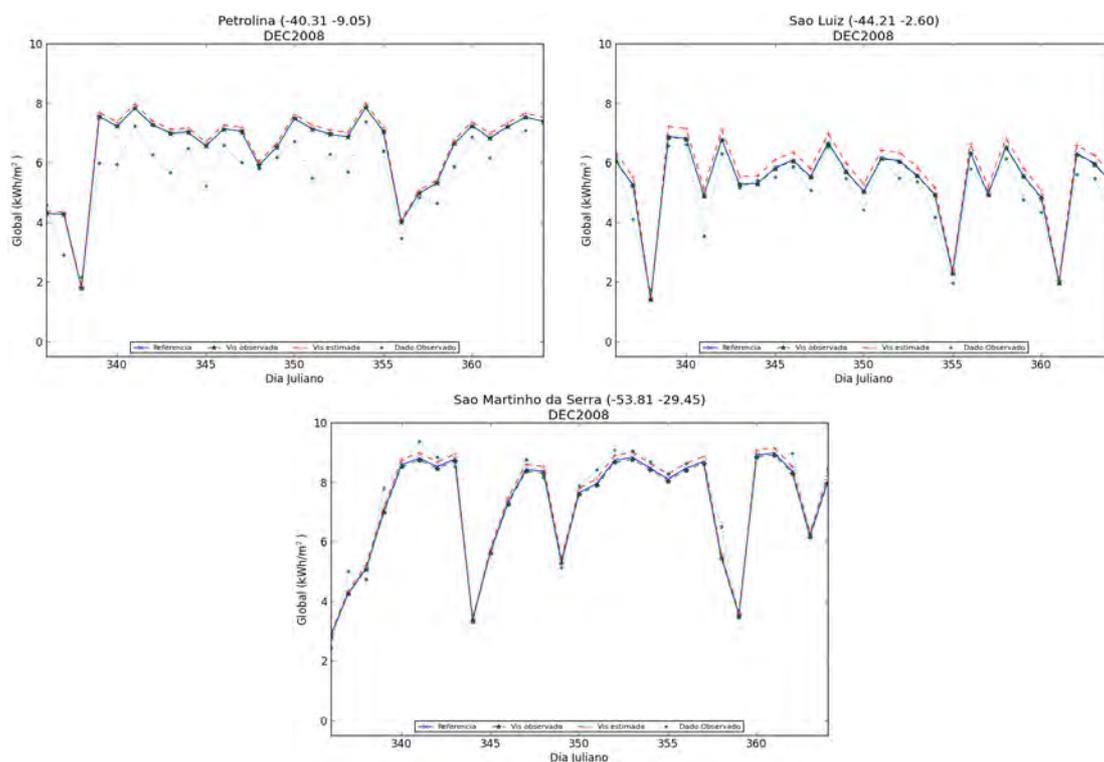


Figura 4.93 – Irradiação global diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) em dezembro de 2008, em Alta Floresta, Brasília, Cuiabá, Ji-Paraná, Ourinhos, Petrolina e São Martinho da Serra.



Continuação da figura 4.92.

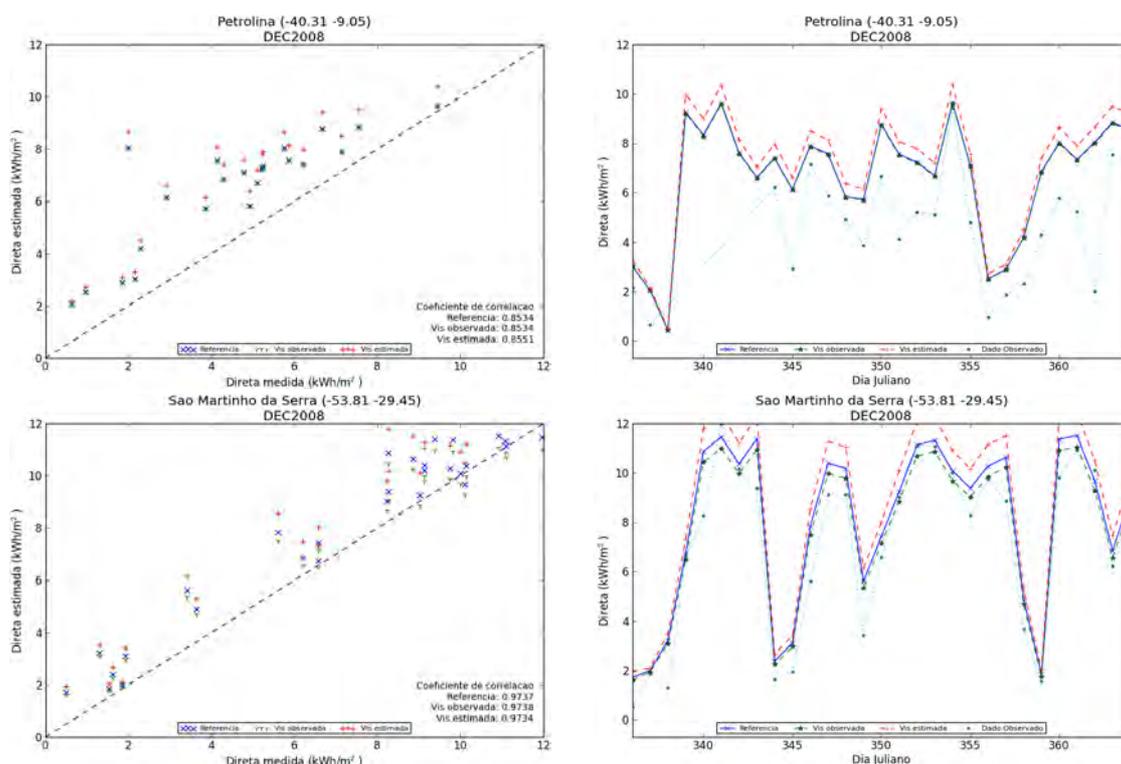


Figura 4.94 – Correlação e valores diários de irradiação direta estimada e irradiação direta medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Petrolina e São Martinho da Serra.

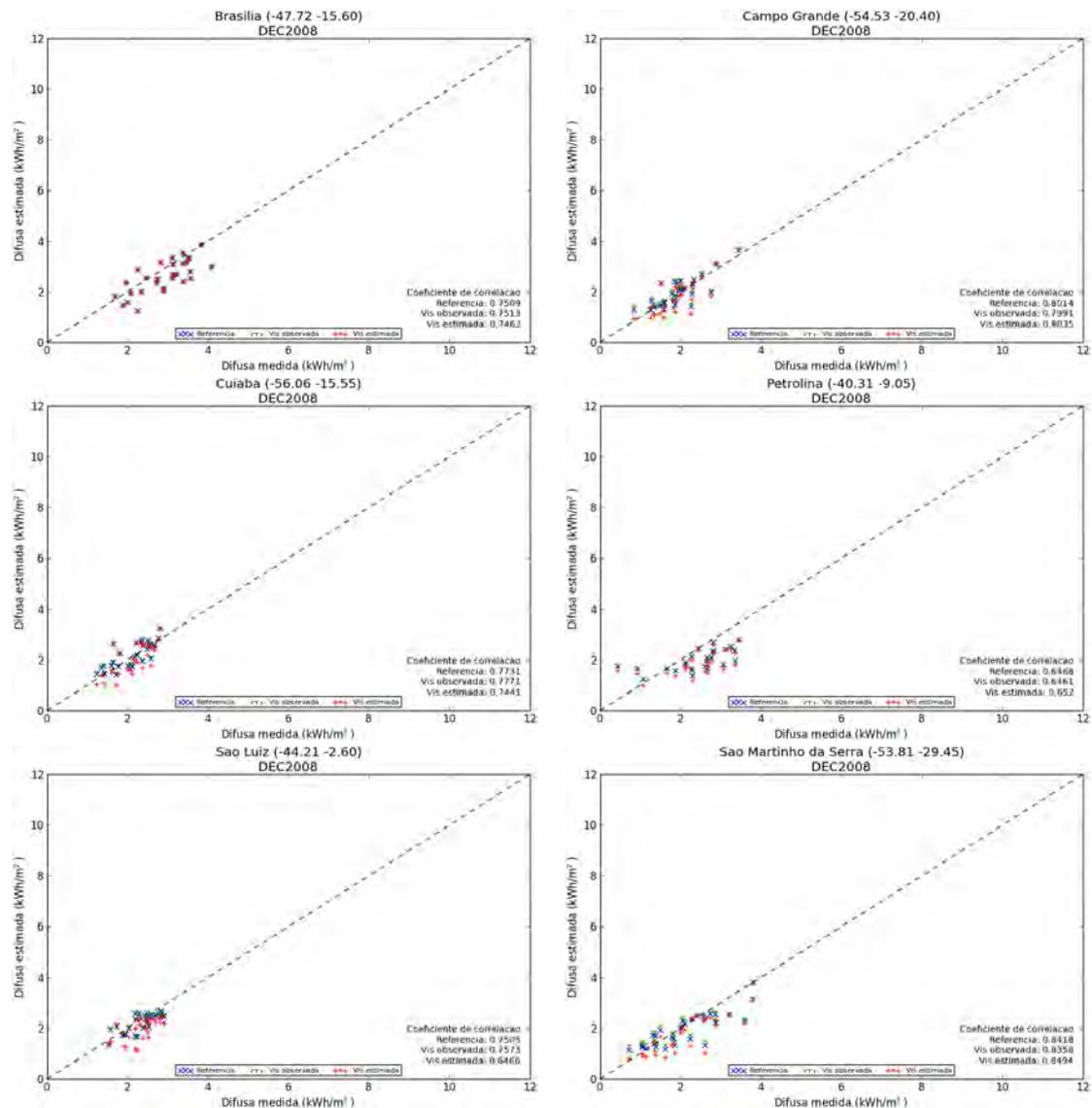


Figura 4.95 – Correlação entre a irradiação difusa diária estimada e a irradiação difusa diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

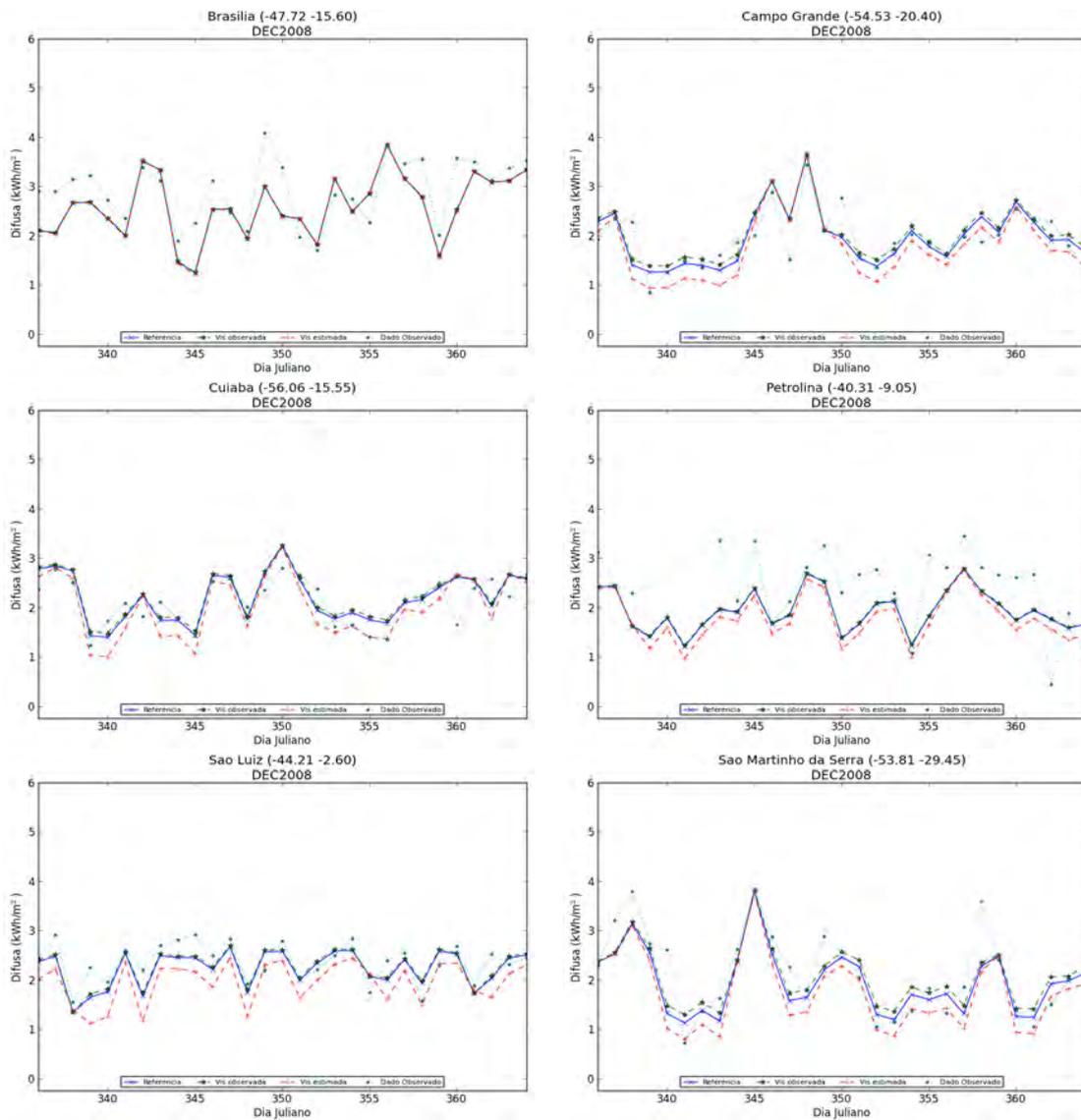


Figura 4.96 – Irradiação difusa diária estimada e irradiação global diária medida (em kWh/m²) no mês de dezembro de 2008, nas estações de Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Petrolina, São Luiz e São Martinho da Serra.

4.6.3.5. Discussão

Assim como feito nos anos anteriores, os valores de viés e RMSE das estimativas anteriormente apresentadas estão nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 para a avaliação das irradiações global, direta e difusa modeladas.

O mês de março de 2008 tem seus valores de viés e RMSE diminuídos em todas as dez estações avaliadas, e em todas elas as simulações utilizaram a visibilidade horizontal observada atualizada.

As simulações do mês de junho apresentaram melhorias nas estimativas de quatro das oito estações avaliadas (Alta Floresta, Cuiabá, Petrolina, São Luiz), sendo que as estimativas realizadas utilizando a base de visibilidade horizontal estimada para a estação de São Martinho da Serra mostraram desvios da mesma ordem das simulações referência.

No caso do mês de setembro, as estimativas apresentaram melhoria nos valores de viés e RMSE em sete das oito estações avaliadas (apenas Brasília não apresentou melhorias, mas ainda assim foram observados valores da mesma ordem nas simulações que utilizaram a base de visibilidade horizontal observada atualizada). Das sete, três delas apresentaram melhores estimativas utilizando a visibilidade horizontal estimada (Alta Floresta, Cuiabá e São Luiz).

Nas simulações realizadas para o mês de dezembro, as estimativas foram melhoradas para as estações de Campo Grande, Cuiabá, São Luiz e São Martinho da Serra. Brasília, Alta Floresta e Petrolina não apresentaram melhorias, mas as simulações com a visibilidade horizontal observada atualizada resultaram em viés e RMSE na mesma ordem.

Tabela 4.7 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação global das simulações realizadas para o ano de 2008.

Irradiação Global		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Alta Floresta	Março	0,523	0,427	0,645	0,806	0,745	0,901
	Junho	-1,519	-1,597	-1,414	1,632	1,703	1,495
	Setembro	0,436	0,428	0,349	0,619	0,614	0,562
	Dezembro	0,592	0,593	0,777	0,900	0,900	1,031
Brasília	Março	0,588	0,524	0,548	0,897	0,856	0,873
	Junho	-0,302	-0,351	-0,863	0,533	0,562	0,970
	Setembro	0,307	0,311	0,321	0,536	0,539	0,545
	Dezembro	0,747	0,753	0,770	0,927	0,932	0,946
Campo Grande	Março	0,309	0,195	0,369	0,520	0,460	0,561
	Junho	-0,143	-0,240	-0,207	0,263	0,324	0,320
	Setembro	0,412	0,366	0,383	0,554	0,522	0,534
	Dezembro	0,108	0,071	0,252	0,588	0,584	0,626
Cuiabá	Março	0,609	0,503	0,725	0,681	0,588	0,793
	Junho	0,242	0,113	0,148	0,342	0,256	0,282
	Setembro	0,711	0,655	0,562	0,810	0,759	0,676
	Dezembro	0,492	0,480	0,656	0,642	0,634	0,771
Natal	Março	0,366	0,248	0,586	0,561	0,489	0,736
Ourinhos	Março	0,370	0,282	0,393	0,543	0,486	0,560
Palmas	Março	0,819	0,736	0,918	0,924	0,851	1,013
	Junho	-0,879	-0,968	-0,923	1,205	1,266	1,240
	Setembro	0,508	0,495	0,599	0,670	0,658	0,748
Petrolina	Março	0,300	0,226	0,379	0,427	0,377	0,498
	Junho	0,045	-0,013	0,145	0,230	0,225	0,322
	Setembro	0,434	0,433	0,603	0,558	0,557	0,706
	Dezembro	0,717	0,720	0,838	0,879	0,881	0,985
São Luiz	Março	1,141	1,052	1,372	1,196	1,110	1,424
	Junho	0,160	0,078	0,447	0,444	0,422	0,614
	Setembro	-0,468	-0,494	-0,115	0,722	0,737	0,595
	Dezembro	0,385	0,364	0,640	0,550	0,534	0,760
São Martinho da Serra	Março	0,094	0,047	0,167	0,473	0,483	0,474
	Junho	0,006	-0,080	-0,012	0,336	0,359	0,369
	Setembro	-0,010	-0,063	0,065	0,435	0,454	0,419
	Dezembro	-0,172	-0,224	-0,025	0,383	0,411	0,343

A tabela 4.8 apresenta os valores de viés e RMSE para as estimativas de irradiação direta nas estações de Brasília, Petrolina e São Martinho da Serra.

Tabela 4.8 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação direta das simulações realizadas para o ano de 2008.

Irradiação Direta		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Brasília	Junho	-0,461	-0,491	-1,865	0,934	0,948	2,043
	Setembro	1,824	1,804	1,850	2,163	2,146	2,184
Petrolina	Março	1,023	1,005	1,679	1,177	1,164	1,758
	Junho	0,402	0,369	0,793	0,700	0,682	0,993
	Setembro	0,765	0,722	1,467	0,967	0,932	1,607
	Dezembro	1,919	1,892	2,402	2,251	2,227	2,691
São Martinho da Serra	Março	0,981	0,687	1,559	1,333	1,142	1,814
	Junho	0,191	-0,104	0,417	0,917	0,984	0,994
	Setembro	0,368	0,113	0,694	0,920	0,855	1,118
	Dezembro	0,888	0,566	1,570	1,196	0,995	1,775

As comparações entre dados estimados e medidos realizadas no mês de março mostram melhorias em todas as estações avaliadas, nas simulações que utilizaram a base de visibilidade horizontal observada atualizada.

Já as simulações para o mês de junho apresentaram melhorias nas estações de Petrolina e São Martinho, enquanto que os menores valores de viés e RMSE de Brasília foram verificados na simulação referência. Mais uma vez, as melhores estimativas foram verificadas utilizando a visibilidade horizontal observada atualizada.

Assim como nas simulações de março, os valores de viés e RMSE das estimativas de setembro foram reduzidos em todas as estações, nas simulações com a base de visibilidade horizontal observada atualizada. O mesmo foi observado nas simulações realizadas para o mês de dezembro, porém os valores de viés e RMSE das estimativas para a estação de Brasília, apesar de ligeiramente melhores, estiveram na mesma ordem da simulação referência.

A irradiação difusa estimada para o ano de 2008 tem os seus valores de viés e RMSE apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Valores de Viés e RMSE (em kWh/m²) das estimativas de irradiação difusa das simulações realizadas para o ano de 2008.

Irradiação Difusa		Viés			RMSE		
		Referência	Vis observada	Vis estimada	Referência	Vis observada	Vis estimada
Brasília	Março	-0,456	-0,515	-0,552	0,744	0,781	0,814
	Junho	0,196	0,162	0,480	0,345	0,327	0,568
	Setembro	-0,428	-0,413	-0,428	0,643	0,634	0,642
	Dezembro	-0,322	-0,314	-0,326	0,550	0,545	0,558
Campo Grande	Março	0,096	0,078	-0,157	0,435	0,434	0,463
	Junho	0,033	0,048	-0,034	0,319	0,345	0,303
	Setembro	-0,627	-0,543	-0,569	1,014	0,943	0,964
	Dezembro	0,024	0,105	-0,172	0,347	0,353	0,428
Cuiabá	Março	0,173	0,148	-0,201	0,288	0,276	0,304
	Junho	0,175	0,223	0,005	0,263	0,314	0,160
	Setembro	-0,590	-0,490	-0,367	0,875	0,799	0,715
	Dezembro	0,079	0,125	-0,109	0,332	0,337	0,421
Natal	Março	0,410	0,320	-0,163	0,543	0,479	0,366
Ourinhos	Março	0,053	0,013	-0,137	0,372	0,371	0,387
Palmas	Março	0,041	-0,027	-0,236	0,599	0,599	0,747
	Junho	1,034	1,018	0,900	1,064	1,047	0,922
	Setembro	-0,021	0,032	-0,133	0,274	0,275	0,307
Petrolina	Março	-0,221	-0,286	-0,485	0,551	0,580	0,684
	Junho	-0,209	-0,253	-0,316	0,397	0,422	0,441
	Setembro	-0,158	-0,132	-0,433	0,312	0,303	0,492
	Dezembro	-0,445	-0,428	-0,585	0,733	0,723	0,819
São Luiz	Março	0,214	0,155	-0,113	0,437	0,408	0,533
	Junho	0,054	0,060	-0,281	0,349	0,349	0,508
	Setembro	-0,352	-0,307	-0,754	0,607	0,585	0,897
	Dezembro	-0,132	-0,095	-0,410	0,296	0,277	0,531
São Martinho da Serra	Março	-0,086	-0,073	-0,319	0,321	0,333	0,432
	Junho	0,056	0,071	0,018	0,211	0,226	0,223
	Setembro	-0,045	0,030	-0,133	0,452	0,426	0,505
	Dezembro	-0,183	-0,065	-0,391	0,485	0,467	0,587

As comparações com estimativas de irradiação difusa realizadas para o mês de março apresentam melhorias em sete das nove estações avaliadas (apenas Brasília e Petrolina não apresentaram melhorias). Em todas as sete, os valores

de viés e RMSE foram reduzidos utilizando a visibilidade horizontal observada atualizada.

As avaliações das simulações para o mês de junho mostram melhorias em cinco das sete estações avaliadas (Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Palmas e São Martinho da Serra), sendo quatro delas utilizando a visibilidade horizontal estimada. As simulações com a base de visibilidade horizontal observada atualizada para a estação de São Luiz apresentaram valores de viés e RMSE da mesma ordem das simulações referência.

Para as avaliações realizadas para o mês de setembro, mais uma vez houve melhoria nas estimativas em cinco de sete estações analisadas. Desta vez, as estações de Brasília, Campo Grande, Petrolina e São Luiz apresentaram melhores estimativas nas simulações com a visibilidade horizontal observada atualizada, enquanto que a estação de Cuiabá apresentou menores valores de viés e RMSE nas simulações com a visibilidade horizontal estimada.

Por fim, as simulações para o mês de dezembro resultaram em melhorias em quatro das seis comparações realizadas (Brasília, Petrolina, São Luiz e São Martinho), todas utilizando a visibilidade horizontal atualizada.

4.6.4. Discussão e conclusões preliminares das avaliações apresentadas

As tabelas seguintes sumarizam os resultados das simulações referência e daquelas simulações que apresentaram melhor desempenho para cada uma das estações avaliadas neste estudo. Quando isso não ocorreu, foi apresentado o resultado mais próximo da simulação referência, para que se pudesse ter uma ideia do aumento do viés / RMSE. A Tabela 4.10 mostra, como dito anteriormente, que para as simulações de irradiação global para o ano de 2006, foram verificadas melhorias em 24 das 30 estações avaliadas.

Essas melhorias chegaram a reduzir em até 6 % os valores de viés nas simulações utilizando a visibilidade horizontal estimada, em especial nos meses e localidades onde é observado um aumento mais efetivo da espessura óptica dos aerossóis, como Alta Floresta, Ji-Paraná e Cuiabá.

Tabela 4.10 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação global das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2006.

Irradiação Global		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Alta Floresta	Março	Referência	3,284	9,530	Observada	1,755	9,070
	Junho	Referência	-21,857	27,158	Estimada	-21,149	26,834
	Setembro	Referência	22,023	24,606	Estimada	16,511	19,798
	Dezembro	Referência	12,016	14,085	Estimada	8,104	10,998
Brasília	Março	Referência	7,279	14,706	Observada	6,234	14,574
	Junho	Referência	-4,392	10,461	Estimada*	-4,948*	10,812*
	Setembro	Referência	6,169	9,142	Estimada	4,853	8,319
	Dezembro	Referência	7,456	11,896	Observada	5,938	10,998
Cuiabá	Março	Referência	6,350	11,346	Observada	4,457	10,306
	Junho	Referência	-1,397	9,991	Estimada*	-2,571*	10,192*
	Setembro	Referência	19,802	23,049	Estimada	14,891	18,751
	Dezembro	Referência	7,428	11,474	Estimada	5,425	10,281
Florianópolis	Março	Referência	1,256	9,179	Observada	-0,130	8,967
	Junho	Referência	-2,063	8,650	Estimada*	-2,223*	9,031*
	Setembro	Referência	0,672	15,040	Estimada*	1,497*	15,203*
Ji-Paraná	Março	Referência	17,333	22,637	Observada	15,050	20,923
	Junho	Referência	-18,084	22,285	Observada*	-19,832*	23,699*
	Setembro	Referência	16,200	19,179	Estimada	9,832	13,909
	Dezembro	Referência	16,159	19,135	Observada	13,962	17,317
Ourinhos	Março	Referência	9,166	16,040	Observada	8,209	15,249
	Junho	Referência	-0,179	6,737	Estimada*	-0,611*	6,869*
	Setembro	Referência	4,519	9,854	Observada	3,304	9,351
	Dezembro	Referência	5,852	9,646	Observada	3,806	8,562
Palmas	Março	Referência	4,751	12,060	Observada	3,358	11,684
	Junho	Referência	-23,818	27,316	Estimada	-22,249	26,159
Petrolina	Março	Referência	9,580	27,231	Observada	8,051	26,715
	Dezembro	Referência	1,497	6,859	Observada	0,115	6,676
São Martinho da Serra	Junho	Referência	5,506	11,939	Observada	2,111	10,701
	Setembro	Referência	1,794	10,732	Observada	-0,114	10,548
	Dezembro	Referência	2,958	9,004	Observada	0,597	8,575

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Verifica-se na Tabela 4.11 que sete das dez estações onde a irradiação direta foi avaliada, apresentaram diminuição dos desvios entre valores estimados e observados de irradiação solar. Os valores de viés foram reduzidos em até 9% nas estações de Florianópolis e São Martinho da Serra, no mês de junho. É importante mencionar que os melhores resultados foram obtidos pelas simulações que utilizaram a visibilidade horizontal observada.

Tabela 4.11 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação direta das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2006.

Irradiação Direta		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Brasília	Março	Referência	54,669	68,872	Estimada*	57,458*	71,670*
	Junho	Referência	3,084	14,759	Observada	2,619	14,605
	Setembro	Referência	32,851	39,043	Estimada*	33,094*	39,250*
	Dezembro	Referência	41,097	47,214	Observada	41,009	47,127
Florianópolis	Março	Referência	53,343	61,795	Observada*	55,729*	64,022*
	Junho	Referência	23,350	33,568	Observada	14,635	24,489
	Setembro	Referência	18,026	35,780	Observada	13,138	32,486
São Martinho da Serra	Junho	Referência	23,870	39,087	Observada	15,781	33,525
	Setembro	Referência	9,749	28,711	Observada	8,923	28,288
	Dezembro	Referência	18,499	25,134	Observada	14,701	22,321

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Os valores de viés e RMSE das simulações de irradiação difusa apresentados na tabela 4.12 mostram que apesar de serem obtidas diminuições de até 17% no viés, o desempenho do modelo neste parâmetro não foi melhorado da mesma maneira que para a irradiação global e direta. Foram verificadas melhorias apenas em cinco das dezesseis estações avaliadas; porém, na maioria delas, os valores de viés e RMSE ainda estiveram próximos daqueles que já eram obtidos antes nas simulações de referência.

Tabela 4.12 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação difusa das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2006.

Irradiação Difusa		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Brasília	Março	Referência	-17,945	25,017	Observada*	-20,754*	27,096*
	Junho	Referência	-11,642	36,745	Observada*	-15,039*	39,232*
	Setembro	Referência	-19,184	27,559	Observada*	-23,082*	30,323*
	Dezembro	Referência	-10,489	19,293	Observada*	-13,624*	21,110*
Cuiabá	Março	Referência	-5,576	18,683	Observada*	-8,117*	19,336*
	Junho	Referência	27,985	49,425	Estimada	20,536	45,270
Ourinhos	Março	Referência	20,154	29,421	Estimada	9,929	25,268
	Junho	Referência	-6,880	24,274	Observada*	-7,819*	25,238*
	Setembro	Referência	-13,758	24,477	Observada*	-15,212*	25,346*
	Dezembro	Referência	-5,102	20,817	Observada*	-8,316*	21,385*
Palmas	Março	Referência	10,260	19,566	Estimada	-4,402	18,533
Petrolina	Março	Referência	-7,484	29,551	Observada*	-11,063*	30,725*
	Dezembro	Referência	-3,868	17,753	Observada*	-8,519*	19,286*
São Martinho da Serra	Junho	Referência	-5,164	27,834	Observada	-4,146	28,156
	Setembro	Referência	-6,831	34,194	Observada	-6,723	33,984
	Dezembro	Referência	-2,715	20,389	Observada*	-4,263*	20,727*

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Para as avaliações de irradiação global estimada para o ano de 2007, verifica-se através da tabela 4.13 que só não houve melhoria em seis das trinta e quatro comparações realizadas. Assim como nas avaliações realizadas para do ano de 2006, as maiores diferenças nas simulações foram observadas em regiões / períodos em que havia maior carga de aerossóis na atmosfera, como no centro-norte do país, nos meses de junho e setembro; exemplifica-se com os valores de viés para Alta Floresta no mês de setembro, que foram reduzidos em aproximadamente 11%. Para estas situações, as simulações que utilizaram a visibilidade horizontal estimada apresentaram melhores resultados.

Tabela 4.13 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação global das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2007.

Irradiação Global		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Alta Floresta	Março	Referência	3,558	8,821	Observada	1,899	8,288
	Junho	Referência	-13,202	15,656	Estimada*	-13,258*	15,804*
	Setembro	Referência	21,477	27,717	Estimada	10,504	19,562
	Dezembro	Referência	26,512	33,330	Observada	24,397	31,653
Brasília	Março	Referência	-14,224	20,007	Estimada*	-14,812*	20,490*
	Junho	Referência	-16,984	18,651	Estimada*	-17,434*	19,083*
	Setembro	Referência	-10,258	15,772	Observada*	-11,324*	16,493*
Campo Grande	Março	Referência	-10,293	13,982	Estimada	-9,408	13,691
	Junho	Referência	-4,246	8,101	Estimada*	-4,343	8,240
	Setembro	Referência	5,619	10,924	Estimada	1,835	9,312
	Dezembro	Referência	6,347	15,067	Observada	4,143	14,202
Cuiabá	Junho	Referência	4,676	6,910	Observada	1,773	5,053
	Setembro	Referência	35,500	37,181	Estimada	26,048	27,647
	Dezembro	Referência	11,281	14,224	Observada	9,260	12,661
Ji-Paraná	Março	Referência	3,246	8,933	Observada	1,548	8,433
	Junho	Referência	-15,897	18,016	Observada*	-17,611	19,505
Natal	Setembro	Referência	26,169	37,792	Estimada	2,054	26,476
	Dezembro	Referência	-15,552	20,544	Estimada	-12,384	18,830
Ourinhos	Março	Referência	-0,238	11,149	Estimada	0,133	11,455
	Junho	Referência	11,890	14,967	Observada	9,979	13,427
	Setembro	Referência	3,675	9,218	Estimada	1,886	8,596
	Dezembro	Referência	13,283	17,177	Observada	11,371	15,712
Palmas	Setembro	Referência	11,631	12,700	Estimada	9,385	10,647
	Dezembro	Referência	17,382	19,977	Observada	15,667	18,492
Petrolina	Março	Referência	-9,784	16,375	Estimada	-8,864	16,225
	Junho	Referência	1,776	0,490	Observada	8,462	8,210
	Setembro	Referência	-2,082	10,929	Estimada	-1,880	11,167
São Luiz	Março	Referência	4,946	19,339	Observada	3,526	19,003
	Junho	Referência	-9,023	12,509	Estimada	-3,349	9,767
	Dezembro	Referência	13,124	16,704	Observada	11,556	15,463
São Martinho da Serra	Março	Referência	1,269	7,621	Observada	-1,159	7,432
	Junho	Referência	5,979	12,036	Observada	2,801	11,380
	Setembro	Referência	14,911	20,242	Observada	12,157	18,455
	Dezembro	Referência	-1,866	5,649	Estimada	-1,367	5,473

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Apenas oito comparações da irradiação direta entre as simulações e dados medidos em superfície puderam ser realizadas no ano de 2007, conforme

apresenta a tabela 4.14. Destas, somente em uma não foi observada melhoria nas simulações, sendo verificadas diminuições no viés de até 8% (em simulações para a estação de São Martinho da Serra). A maior parte das melhorias foi obtida utilizando a visibilidade horizontal observada.

Tabela 4.14 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação direta das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2007.

Irradiação Direta		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Brasília	Março	Referência	-11,765	19,598	Estimada	-10,268	18,951
	Junho	Referência	-33,248	35,501	Estimada	-32,068	34,433
	Setembro	Referência	-13,198	18,067	Observada*	-13,572*	18,229*
Petrolina	Junho	Referência	6,168	18,806	Observada	5,523	18,627
São Martinho da Serra	Março	Referência	24,521	41,894	Observada	19,871	38,159
	Junho	Referência	22,813	38,639	Observada	14,757	35,222
	Setembro	Referência	59,548	82,128	Observada	52,055	75,828
	Dezembro	Referência	19,658	25,202	Observada	15,223	22,220

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Assim como as simulações para o ano de 2006, as estimativas de irradiação difusa foram aquelas onde foram observadas menos avanços no uso das bases de visibilidade horizontal. Neste caso, quatorze das vinte e quatro simulações apresentaram melhorias, que chegaram a até 12%.

Para as avaliações de irradiação global estimada para o ano de 2008, observa-se que assim como nos anos anteriores a grande maioria das comparações se mostraram positivas para o uso das novas bases de visibilidade horizontal, mas as diferenças não foram tão pronunciadas como nos anos de 2006 e 2007. Oito das trinta e quatro comparações realizadas mostraram melhores resultados nas simulações referência, e dentre as melhorias verificadas, os valores de viés chegaram a ser reduzidos em até 6%.

Tabela 4.15 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação difusa das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2007.

Irradiação Difusa		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Brasília	Março	Referência	-4,974	25,454	Observada*	-7,989*	26,213*
	Junho	Referência	61,246	82,143	Estimada	53,534	76,524
	Setembro	Referência	12,195	24,119	Observada	8,442	22,537
Campo Grande	Março	Referência	-0,511	22,528	Observada*	-1,638*	23,480*
	Junho	Referência	8,461	34,073	Estimada	-2,595	30,943
	Setembro	Referência	-21,661	29,596	Estimada	-14,394	26,967
	Dezembro	Referência	-5,593	20,190	Observada*	-6,930*	20,327*
Cuiabá	Junho	Referência	33,368	41,312	Estimada	21,027	31,622
	Dezembro	Referência	-0,747	20,317	Observada*	-3,307*	20,543*
Natal	Setembro	Referência	26,169	37,792	Estimada	20,718	26,476
Ourinhos	Março	Referência	21,856	52,939	Estimada	5,704	46,930
	Junho	Referência	-0,801	27,750	Observada	-0,422	28,674
	Setembro	Referência	-7,111	23,123	Estimada	-6,826	23,475
	Dezembro	Referência	13,283	17,177	Observada	11,371	15,712
Palmas	Setembro	Referência	24,481	30,020	Observada	20,517	26,955
	Dezembro	Referência	-0,013	22,429	Observada*	-3,155*	22,594*
Petrolina	Março	Referência	-2,018	17,813	Observada*	-4,669*	18,192*
	Junho	Referência	-11,490	26,104	Observada*	-13,817*	27,307*
São Luiz	Junho	Referência	-25,116	40,267	Observada*	-25,462*	40,424*
	Dezembro	Referência	0,731	12,822	Observada*	-0,819*	12,700*
São Martinho da Serra	Março	Referência	-15,657	24,292	Observada*	-16,754*	24,803*
	Junho	Referência	-2,470	31,442	Observada	-0,358	30,876
	Dezembro	Referência	-5,612	27,456	Observada	-5,590	28,631

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Das dez comparações realizadas entre os dados de irradiação direta estimados e medidos, apresentados na tabela 4.17, em apenas uma não houve melhoria efetiva. Os valores de viés foram reduzidos em até 5%, sendo as simulações com a visibilidade horizontal observada aquelas onde os melhores resultados foram obtidos.

Tabela 4.16 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação global das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2008.

Irradiação Global		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Alta Floresta	Março	Referência	11,196	17,243	Observada	9,139	15,944
	Junho	Referência	-26,928	28,929	Estimada	-25,071	26,491
	Setembro	Referência	7,871	11,178	Estimada	6,305	10,132
	Dezembro	Referência	14,495	22,034	Observada*	14,526*	22,051*
Brasília	Março	Referência	11,233	17,127	Observada	10,008	16,343
	Junho	Referência	-6,044	10,657	Observada*	-7,010*	11,223*
	Setembro	Referência	5,149	8,995	Observada*	5,222*	9,037*
	Dezembro	Referência	16,347	20,279	Observada*	16,475*	20,380*
Campo Grande	Março	Referência	5,722	9,623	Observada	3,607	8,506
	Junho	Referência	2,593	25,172	Estimada*	-2,656*	23,898*
	Setembro	Referência	7,833	10,520	Observada	6,959	9,925
	Dezembro	Referência	1,625	8,840	Observada	1,068	8,780
Cuiabá	Março	Referência	11,988	13,416	Observada	9,903	11,576
	Junho	Referência	6,186	8,742	Observada	2,873	6,538
	Setembro	Referência	13,452	15,336	Estimada	10,641	12,791
	Dezembro	Referência	8,852	11,549	Observada	8,625	11,404
Natal	Março	Referência	6,371	9,766	Observada	4,318	8,521
Ourinhos	Março	Referência	6,911	10,136	Observada	5,263	9,077
Palmas	Março	Referência	18,689	21,077	Observada	16,795	19,428
	Junho	Referência	-16,923	23,191	Estimada*	-17,764*	23,868*
	Setembro	Referência	8,815	11,632	Observada	8,594	11,418
Petrolina	Março	Referência	5,221	7,440	Observada	3,939	6,571
	Junho	Referência	1,042	5,300	Observada	-0,304	5,187
	Setembro	Referência	6,909	8,882	Observada	6,883	8,858
	Dezembro	Referência	12,573	15,407	Observada*	12,617*	15,441*
São Luiz	Março	Referência	30,351	31,800	Observada	27,972	29,518
	Junho	Referência	3,669	10,151	Observada	1,794	9,660
	Setembro	Referência	-7,801	12,048	Estimada	-1,914	9,922
	Dezembro	Referência	7,694	10,983	Observada	7,264	10,663
São Martinho da Serra	Março	Referência	1,571	6,970	Observada	-0,795	6,859
	Junho	Referência	0,241	13,279	Estimada*	-0,493*	14,591*
	Setembro	Referência	-0,213	9,153	Observada*	-1,321*	9,546*
	Dezembro	Referência	-8,597	22,739	Observada	-3,059	21,920

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Tabela 4.17 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação direta das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2008.

Irradiação Direta		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Brasília	Junho	Referência	-6,703	13,574	Observada*	-7,138*	13,789*
	Setembro	Referência	30,816	36,540	Observada	30,475	36,256
Petrolina	Março	Referência	22,669	26,102	Observada	22,274	25,798
	Junho	Referência	10,353	18,029	Observada	9,514	17,562
	Setembro	Referência	12,448	15,735	Observada	11,753	15,157
	Dezembro	Referência	42,586	49,955	Observada	41,991	49,430
São Martinho da Serra	Março	Referência	17,449	23,707	Observada	12,220	20,316
	Junho	Referência	5,196	24,932	Observada	-2,825	26,768
	Setembro	Referência	7,074	17,677	Observada	2,178	16,425
	Dezembro	Referência	12,492	16,833	Observada	7,958	14,008

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Para as comparações entre valores estimados e valores medidos de irradiação difusa realizadas, o ano de 2008 foi aquele onde as simulações apresentaram melhores resultados, sendo obtidas melhorias em dezesseis das vinte e quatro comparações. Os valores de viés e RMSE exibidos na tabela 4.18 mostram que as simulações com as bases de visibilidade horizontal observada e estimada diminuíram o viés em até 15%; mas, de um modo geral, as reduções foram menores.

Observando todos os resultados apresentados neste capítulo, verifica-se, de um modo geral, as simulações realizadas utilizando a base de visibilidade horizontal observada apresentaram melhorias nos resultados obtidos com a base de visibilidade climatológica, tomada como referência. Ainda que muitas destas melhorias se apresentem de maneira discreta, uma nova climatologia de visibilidade horizontal apresenta valores mais condizentes com as atuais características do território brasileiro, em termos de uso do solo e mesmo em função da variabilidade temporal dos aerossóis atmosféricos.

Tabela 4.18 – Valores de Viés e RMSE (em %) das estimativas de irradiação difusa das simulações referência e das melhores simulações para o ano de 2008.

Irradiação Difusa		Resultados Referência			Melhores Resultados		
		Simulação	Viés	RMSE	Visibilidade	Viés	RMSE
Brasília	Março	Referência	-19,349	31,580	Observada*	-21,861*	33,154*
	Junho	Referência	19,688	34,567	Observada	16,207	32,787
	Setembro	Referência	-24,596	36,992	Observada	-23,744	36,446
	Dezembro	Referência	-11,058	18,870	Observada	-10,793	18,701
Campo Grande	Março	Referência	5,045	22,808	Observada	4,092	22,728
	Junho	Referência	2,593	25,172	Estimada*	-2,656*	23,898*
	Setembro	Referência	-29,794	48,158	Observada	-25,779	44,758
	Dezembro	Referência	1,267	18,000	Observada*	5,432*	18,310*
Cuiabá	Março	Referência	9,492	15,788	Observada	8,093	15,135
	Junho	Referência	16,034	24,106	Estimada	0,439	14,673
	Setembro	Referência	-27,204	40,347	Estimada	-16,949	32,967
	Dezembro	Referência	3,728	15,649	Observada*	5,878*	15,864*
Natal	Março	Referência	23,667	31,357	Estimada	-9,402	21,147
Ourinhos	Março	Referência	2,922	20,60	Observada	0,745	20,574
Palmas	Março	Referência	1,870	27,308	Observada	-1,252	27,301
	Setembro	Referência	-1,244	16,366	Observada*	1,930*	16,424*
Petrolina	Março	Referência	-9,267	23,081	Observada*	-11,954	24,297
	Junho	Referência	-10,114	19,170	Observada*	-12,209*	20,367*
	Setembro	Referência	-9,909	19,583	Observada	-8,298	19,011
	Dezembro	Referência	-18,241	30,041	Observada	-17,538	29,647
São Luiz	Março	Referência	9,018	18,432	Observada	6,519	17,178
	Junho	Referência	2,691	17,462	Observada*	3,027*	17,452*
	Setembro	Referência	-13,076	22,568	Observada	-11,409	21,742
	Dezembro	Referência	-5,589	12,534	Observada	-4,030	11,745
São Martinho da Serra	Março	Referência	-4,856	18,069	Observada	-4,105	18,789
	Junho	Referência	6,057	22,988	Estimada	1,972	24,298
	Setembro	Referência	-3,161	31,473	Observada	2,087	29,636
	Dezembro	Referência	-8,597	22,739	Observada	-3,059	21,920

* resultados mais próximos aos da simulação referência.

Verificou-se que a visibilidade horizontal estimada apresentou melhores resultados em situações e regiões e períodos onde foram observadas elevada carga de aerossóis, sendo deficiente na representação de situações de baixa espessura óptica dos aerossóis. Isso pode ser efeito da formulação proposta por Vermote *et al.* (2002), que em condições de espessura óptica abaixo de

0,16 apresenta visibilidade horizontal acima de 50 km, valores que são limítrofes na visibilidade climatológica, por exemplo.

O modelo apresentou melhorias significativas com a atualização da base de visibilidade horizontal. As simulações realizadas para o mês de março, que é o mês onde são verificadas as melhores condições de visibilidade horizontal durante o ano, apresentaram melhorias em praticamente todas as comparações de irradiação global, e em grande parte das simulações realizadas no mês de dezembro. Porém, quando falamos da queima da biomassa, temos que levar em consideração que as plumas podem atingir altos níveis da atmosfera, além do fato de haver o transporte atmosférico. Isso diminuiria a relação entre a quantidade de aerossóis e a visibilidade horizontal na superfície, uma vez que estando em elevadas altitudes, ela não seria considerada pelas observações dos aeroportos.

Visando minimizar este problema, buscou-se o dado de espessura óptica dos aerossóis do modelo CATT-BRAMS para a geração de uma base de visibilidade horizontal estimada. Este recurso inseriu nas simulações do modelo BRASIL-SR não só a quantidade de aerossóis na coluna atmosférica, como a capacidade de transporte deste material particulado, já que a atuação de sistemas sinóticos tem a capacidade de transportar essas plumas para regiões distantes.

Os valores das estimativas de irradiação direta e difusa também apresentaram melhorias, mas estas não foram tão pronunciadas quanto as de irradiação global; Acredita-se que para este caso, outra parametrização do modelo BRASIL-SR precisa receber uma devida atenção: a identificação da condição de nebulosidade.

Este parâmetro, considerado de primeira ordem nas estimativas do modelo, pode sofrer contaminação das mesmas situações de queima de biomassa, quando as plumas são erroneamente identificadas como nuvens. A determinação do coeficiente efetivo de cobertura de nuvens utiliza métodos

estatísticos para a identificação de céu claro e encoberto, que podem estar sendo contaminados pela presença da fumaça, lançada à atmosfera em eventos de queima de biomassa.

Além dos problemas no diagnóstico da cobertura de nuvens, o uso de valores mensais de visibilidade horizontal aplica para as regiões características médias de aerossóis. Isso também pode inserir erros nas estimativas, visto que quando a região não estiver dentro das condições médias mensais esperadas (com uma condição de visibilidade horizontal mais baixa ou mesmo mais alta que a média mensal utilizada) o modelo continuará apresentando elevados valores de viés e RMSE em suas estimativas.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo físico de transferência radiativa BRASIL-SR é o principal recurso em uso hoje, dentro do Grupo de Pesquisa em Recursos Renováveis e Bioenergia do CCST/INPE, na quantificação do recurso energético solar. Este modelo, que foi exaustivamente avaliado, originando publicações de impacto como o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2006), apresenta resultados bastante satisfatórios em suas estimativas; porém não consegue representar de maneira adequada a radiação solar incidente quando em situações de elevada carga de aerossóis atmosféricos. Para parametrizar os referidos aerossóis, o BRASIL-SR faz uso de dados de visibilidade horizontal. Porém, os valores climatológicos desta variável não conseguem representar de maneira adequada condições de elevada carga de aerossóis atmosféricos, verificadas em situações de queima de biomassa ou mesmo como resultado da poluição das grandes cidades.

Foi proposto neste trabalho trazer para o modelo BRASIL-SR essa informação de aerossol de maneira mais consistente, que pudesse permitir não só uma representação adequada dos aerossóis, mas também do seu comportamento sazonal. Seu tempo de vida, os regimes de precipitação e o próprio transporte atmosférico regulam a sua permanência na atmosfera, bem como na sua permanência nas suas regiões de origem.

Foi implementada a atualização da base de visibilidade horizontal, com valores observados nos anos de 2006, 2007 e 2008. Isso foi feito através de dados de aeroportos de toda a América do Sul e originaram médias mensais de visibilidade horizontal, com valores que variavam entre 13 km e 6 km e resultaram em mapas bastante coerentes com climatologias apresentadas em outros estudos, como Rosário (2011).

Visando eliminar as limitações das observações superficiais da visibilidade horizontal (subjetividade, ausência de observações em toda a coluna atmosférica), também foram realizadas estimativas de visibilidade horizontal através dos dados de espessura óptica dos aerossóis em 550nm obtidos através do modelo CATT-BRAMS. As estimativas resultaram em valores de visibilidade horizontal com uma amplitude bem maior, podendo chegar a até 250 km; ao mesmo tempo, em condições de elevada espessura óptica dos aerossóis, a visibilidade horizontal estimada era da ordem de 3 km. Os valores de visibilidade horizontal estimada foram mais consistentes com os focos de queimadas verificados no período, o que já era esperado, visto que o modelo CATT-BRAMS agrega essa informação em suas simulações. As duas bases de dados permitiram inserir no modelo BRASIL-SR uma caracterização mais consistente do território Brasileiro em termos da distribuição temporal, espacial e também sazonal dos aerossóis atmosféricos.

Para avaliar as bases de visibilidade horizontal desenvolvidas, foram realizadas simulações para os meses de março, junho, setembro e dezembro dos anos de 2006, 2007 e 2008. Assim, não só o comportamento do modelo BRASIL-SR em função da sazonalidade dos aerossóis poderia ser medido, mas também sua capacidade de assimilar as características interanuais da atmosfera. Durante os três anos avaliados, foram observadas atuações de sistemas meteorológicos diversos e uma grande variabilidade em termos da quantidade de focos de queima de biomassa. Esses processos regulam a quantidade de aerossóis na atmosfera, seu transporte e também a sua remoção.

De um modo geral, as simulações que utilizaram os dados de visibilidade horizontal observada em aeroportos apresentaram melhorias significativas nos valores das estimativas de irradiação global, com diminuições dos valores de viés que chegaram a ser da ordem de 3%, 4% e 5% para os anos de 2006, 2007 e 2008, respectivamente. Os resultados das simulações com a base de visibilidade horizontal estimada pela espessura óptica dos aerossóis do modelo CATT-BRAMS apresentaram melhor desempenho nos meses e nas regiões

onde havia uma elevada carga de aerossóis, como por exemplo, a região Centro-Norte do país, no mês de setembro. Para estes casos, foram verificadas diminuições de viés e RMSE acima de 11%, no mês de setembro de 2007 na estação de Alta Floresta. Isso demonstra a influência dos aerossóis na quantificação do recurso energético solar nestas condições extremas.

Porém, as melhorias não foram tão efetivas quando a base de visibilidade horizontal estimada foi utilizada nas regiões com baixa carga de aerossóis; havendo, inclusive, aumento do viés em algumas situações. Nestes casos, a base de visibilidade horizontal atualizada apresentou melhores resultados, mostrando que o simples condicionamento da atmosfera para condições médias mais próximas das reais já traz melhorias efetivas nas simulações.

Os valores das estimativas de irradiação direta e difusa apresentaram melhorias, mas estas não foram tão efetivas quanto aquelas verificadas na irradiação global. Apesar de serem observadas diminuições pontuais nos valores de viés e RMSE em grande parte das comparações realizadas com estimativas de irradiação direta (diminuição no viés da ordem de 9%, 8% e 5% nos anos de 2006, 2007 e 2008, respectivamente) e de irradiação difusa (diminuição no viés da ordem de 17%, 12% e 15% nos anos de 2006, 2007 e 2008, respectivamente), muitas das comparações mostraram que as simulações não mantiveram o mesmo nível de melhoria da irradiação global. É importante mencionar que, de um modo geral, os desvios estiveram próximos aos das integrações do modelo que utilizaram a visibilidade horizontal climatológica. A principal hipótese para essas diferenças é a de que a parametrização de cobertura efetiva de nuvens interfira nestes resultados.

5.1. Trabalhos futuros

Diante das conclusões observadas neste trabalho, entende-se como sendo os próximos passos para melhorias no modelo BRASIL-SR:

- Avaliação da relação sugerida por Vermote *et al.* (2002) para a estimativa da visibilidade horizontal através dos dados de espessura óptica dos aerossóis para um longo período de dados, buscando um melhor ajuste para as regiões e condições de baixa carga de aerossóis;
- Mudança da metodologia utilizada para identificação da cobertura de nuvens das imagens utilizada pelo modelo BRASIL-SR, inserindo, por exemplo, a avaliação da temperatura nas imagens, para identificar com maior precisão a condição de nebulosidade. Assim, as plumas originadas na queima da biomassa, que possuem maior temperatura, poderiam ser corretamente parametrizadas, diminuindo o viés do modelo nas estimativas de irradiação direta e difusa;
- Operacionalização do modelo BRASIL-SR, fazendo com que ele passe a realizar estimativas diárias. Hoje, o modelo opera apenas em caráter de pesquisa, não fornecendo informações de irradiação diária de forma automatizada. Este passo envolve muito trabalho de ordem computacional, já que todo o código precisaria ser adaptado para a realização de integrações diárias;
- Geração de bases de visibilidade horizontal diárias, mesclando diferentes fontes de informação. Este passo está indiretamente incluído na operacionalização do modelo, e o uso conjunto das informações de visibilidade horizontal dos aeroportos com informações de modelos de transporte de poluentes agregaria maior confiabilidade ao valor das estimativas do BRASIL-SR, utilizando o valor de visibilidade mais condizente com a região.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERONET – NASA, página da internet. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, acessado em fevereiro de 2008.

AIRES, C. B.; KIRCHOFF, V. W. J. H. Transporte de monóxido de carbono gerado em queimadas para regiões onde não se queima. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, n. 1, p. 61–74, 2001.

ALBUQUERQUE, T. T. A. **Formação e transporte das partículas finas inorgânicas em uma atmosfera urbana: o exemplo de São Paulo**. Tese de Doutorado — Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2010.

ANDERSON, B.E., GRANT, W.B., GREGORY, G.L., BROWELL, E.V., COLLINS JR., J.E., SACHSE, W.G., BAGWELL, D.R., HUDGINS, C.H., BLAKE, D.R., BLAKE, N.J. Aerosols from burning over the tropical South Atlantic region: distributions and impacts. **J. Geophys. Res.** 101(D19) (24), 117–137, 1996.

ANDRADE, M. F., SILVA DIAS, M. A. F. Precipitation trends and the effects of aerosol: urban climate change in São Paulo. In: **International Conference on Environmental Physics**. Brasília, Brasil, 1999.

ANDRADE, F.; ORSINI, C.; MAENHAUT, W. Relation between aerosol sources and meteorological parameters for inhalable atmospheric particles in São Paulo city, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 28, p. 2307-2315. 1994.

ANDREAE, M. O., Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: **Global Biomass Burning: Atmospheric Climatic and Biospheric Implications**, editado por J. S. Levine, p. 3-21, MIT Press, Cambridge, Mass., 1991.

ANDREAE, M. O., E CO-AUTORES: Smoking clouds over the Amazon. **Science**, 303, 1337-1341, 2004.

ANGSTROM, A. The parameters of atmospheric turbidity. **Tellus**, 16, 64-75, 1964.

ARANUVACHAPUN, A., 1983. Variation of atmospheric optical depth for remote sensing radiance calculations. **Remote Sensing Environ.** 13, 131–147.

BADARINATH, K. V.S.; LATHA, K. M.; CHAND, T. R. K.; GUPTA, P. K.; HOSK, A. B.; JAIN, S. L.; GERA, B. S.; SINGH, R.; SARKAR, A. K.; SINGH, N.; PARMAR, R. S.; KOUL, S.; KOHLI, R.; NATH, S.; OJHA, V. K. SINGH, G. Characterization of aerosols from biomass burning – a case study from Mizoram (Northeast), India. **Chemosphere**, n. 54, p. 167-175, 2004.

BARNES, W. L., PAGANO, T. S., SALOMONSON, V. V., Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**, vol. 36, p. 1088-1100, 1998.

- BASTOS, E.J.B.; FUNATSU, B.M., BONFIM, A., MORAES, E. C., CEBALLOS, J. C., Estimativa da radiação solar global para a América do Sul via satélite. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, pp. 596-600. Campos do Jordão, SP, 1996.
- BAÜMER, D., VOGEL, B., VERSICK, S., RINKE, R., MOHLER, O., SCHNAITER, M.: Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany, **Atmos. Environ.**, 42(5), 989–998, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.10.017, 2008.
- BENTLEY, R.W., Global Oil and Gas Depletion: An Overview. **Energy Policy**. v. 30, p.189-205, 2002.
- 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**, Freiburg, Alemanha. 2004.
- BOTKIN, D.; KELLER, E. A. **Environmental science: earth as living planet**. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- BUCHOLTZ, A., Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. **Applied Optics**, vol. 34, p. 2765-2773, 1995
- CASTANHO, A. D. A. **A determinação quantitativa de fontes de material particulado na atmosfera da cidade de São Paulo**. 131p, Dissertação de Mestrado, Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- CASTANHO, A. D. A. **Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo**. Tese de Doutorado — Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2005.
- CASTANHO, A. D. A., ARTAXO, P. Wintertime and summertime São Paulo aerosol source apportionment study. **Atmos. Environ.**, 35, 4889-4902, 2001.
- CCOYLLO, O. R., **Identificação da contribuição das fontes locais e remotas de poluentes na Região Metropolitana de São Paulo**. Tese de Doutorado, IAG-USP, 2002.
- CCOYLLO, O. R. S., ANDRADE, M. F. The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil. **Environmental Pollution**, 116: 257-263.
- CEBALLOS, J.C., BOTTINO M.J. Estimativa de radiação solar por satélite: Desempenho do modelo operacional GL1.2. In: **Anais, XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, 2004.
- CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J.; SOUZA, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **J. Geoph. Res**, v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004

CEBALLOS, J.C., MOURA, G.B.A. Solar radiation assessment using Meteosat 4-VIS imagery. **Solar Energy** 60,209-219. 1997.

CETESB, **Relatório de Qualidade do ar no Estado de São Paulo**, Série Relatórios / Secretaria de Estado do Meio Ambiente, ISSN 0103-4103, 2002.

CHAGAS, R. C., MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A., PEREIRA, E. B. Procedimentos de qualificação de dados da rede de estações do Projeto SONDA. In: **XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2006, Florianópolis. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

CHRISTOPHER, S. A.; CHOU, J.; ZHANG, J.; LI, X.; WELCH, R. M. Shortwave direct radiative forcing of biomass burning aerosols estimated from virs and ceres. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 15, 2000.

CHRISTOPHER, S.A., KLICHE, D.V., CHOU, J., WELCH, R.M. First estimates of the radiative forcing of aerosols generated from biomass burning using satellite data. **J. Geophys. Res.** 101, 21256–21273, 1996.

CHU, D. A.; KAUFMAN, Y. J.; ICHOKU, C; REMER, L. A.; TANRÉ, D.; HOLBEN, B. N.: Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. **Geophys. Res. Lett.**, 29, 8007, 2002.

CHU, D. A.; KAUFMAN, Y. J.; ZIBORDI, G.; CHERN, J. D.; MAO, J.; LI, C.; HOLBEN, B. N. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system-terra moderate resolution imaging spectroradiometer (modis). **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D21, 2003.

COLLE, S., ABREU, S. L., COUTO, P., MANTELLI, S., PEREIRA, E. B., RASCHKE E., STUHLMANN, E., R., Distribution of Solar Irradiation in Brazil derived from Geostationary data, CD (10 pp.) **Proceedings from the ISES 1999 Solar World Congress**, Israel, July 4 to 9, 1999.

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.

COTTON, W. R., ET AL. RAMS 2001: current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 82, p. 5–29, 2003.

CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, n. 4988, 1990.

DARNELL, W. L.; STAYLOR, W. F.; GUPTA, S. K.; DENN, F. M. Estimation of surface insolation using sun-synchronous satellite data. **Journal of Climate**, 1, 820-835, august, 1988.

DARNELL, W. L.; STAYLOR, W. F.; GUPTA, S. K.; RITCHEY, N. A.; WILBER, A. C. Seasonal variation of surface radiation budget derived from International Satellite Cloud Climatology Project C1 data. **Journal of Geophysical Research**, 97, D14, 15741-15760, 1992.

DESCHAMPS, P.Y., HERMAN, M., TANRÉ, D., 1981. Influence de atmosphere en tldtection des ressources terrestres: Modelisation et possibilites de correction, **Colloque de La Sociel International de photogrammetric et de Teledetection**, Avlgnon, France 8–11, pp. 543–558.

DEDIEU, G., DESCHAMPS, P. Y.; KERR, Y. H. Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the Earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data. **J. of Climate and Appl. Meteorology**, 26, 79-87, 1987.

DEL GENIO, A. D.; WOLF, A. B.; TSELILOUDIS, G. Factors determining the temperature dependence of the optical thickness of low clouds. **Proceedings of the Sixth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting**. San Antonio, Texas, March 4-7,1996.

DIEKMANN, F. J.; HAPP, S.; RIELAND, M.; KÖLN, BENESCH, W.; OFFENBACH, GZEPLAK, 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.

DINER, D. J., BECKERT, J. C. REILLY, T. H., BRUEGGE, C. J., CONEL, J. E., KAHN, R. MARTONCHICK, J. V., ACKERMAN, T. P., Multi-angle Imaging SpetroRadiometer (MISR) description and experiment overview. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, vol. 36, p. 1072-1087, 1998.

DUBOVIK, O., HOLBEN, B. N., LOPYONOK, T., SINYUK, A., MISHCHENKO, M. I., YANG, P., SLUTESKER, I., Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids. **Journal of Geophysical Research**, vol. 29 (10), p. 1415, 2002.

DZUBAY, T.G., STEVENS, R.K., LEWIS, C.W., HERN, D.H., COURTNEY, W.J., TESCH, J.W., MASON, M.A. Visibility and aerosol composition in Houston, Texas. **Environmental Science and Technology** 16, 514–525, 1982.

ECK, T.F., HOLBEN, B.N., SLUTSKER, I., SETZER, A. Measurements of irradiance attenuation and estimation of aerosol single scattering albedo for biomass burning aerosols in Amazonia. **J. Geophys. Res.** 103 (D24), 31865–31878, 1998.

ELDERING, A., CASS, G.R., MOON, K.C.. An air monitoring network using continuous particle size distribution monitors: connecting pollutant properties to visibility via Mie scattering calculations. **Atmospheric Environment** 28, 2733–2749, 1994.

FEREK, R. J.; REID, J. S.; HOBBS, P. V. Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, 103(D24), 32107-32118, 1998.

FRAZER, R. S. Satellite measurement of mass of Saharam dust in the atmosphere. **Appl. Opt.**, vol 15, p 2471-2479, 1976.

FREITAS, S., K. LONGO, M. A. F. SILVA DIAS, P. L. SILVA DIAS, R. CHATFIELD, E. PRINS, P. ARTAXO, G. GRELL, F. RECUERO. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics, 5th RAMS Users Workshop Special Issue**, 2003.

FREITAS, S.; LONGO, K.; DIAS, M. S.; DISAS, P. S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G.; RECUERO, F. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 5, n. 1-2, 2005.

FINLAYSON-PITTS, B. J., PITTS, J. N. **Chemistry of the upper end lower atmosphere: theory, experiments and applications**. Academic Press, San Diego, 1999.

GAMBI, W.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; COUTO, P.; COLLE, S. Influência da altitude e do tamanho das cidades nas previsões de radiação solar do modelo "IGMK" no Brasil. **Rev. Bras. Geof.**, Mar, vol.16, no.1, p.15-25, 1998.

GAUTIER, C., DIAK, G., MASSE, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. **J. Appl. Meteorology**, 19, 1005-1012, 1980.

GELLER, H. S. **Revolução Energética: políticas para um futuro sustentável**. Rio de Janeiro, Relume Dumará, 299p. 2003.

GEVAERD, R., FREITAS, S.R. Determinação operacional da umidade do solo para assimilação em modelos de previsão numérica do tempo. **In: XI Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP**, São Carlos. Anais do Simpósio. 2003

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A new approach to parameterizing convection using ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**. v.29. Art. N^o p.1693, 2002

GRIGGS, M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data. **J. Air Pollut. Control Assoc.**, vol 25, p 622-626, 1975.

GUARNIERI, R. A., **Emprego de redes neurais artificiais e regressão linear múltipla no refinamento das previsões de radiação solar do modelo ETA**. Dissertação de Mestrado - INPE, São José dos Campos, 2006.

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, Florianópolis, 2006.

GUYON, P.; FRANK, G.; WELLING, M.; CHAND, D.; ARTAXO, P.; NISHIOKA, G.; RIZZO, L. V.; LLOYD, J.; KOLLE, O.; SILVA DIAS, M. A. F.; GATTI, L. V.; CORDOVA, A. M.; ANDREAE, M. O. Airborne measurements of trace gases and aerosol particles emissions from biomass burning in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, 5: 2.791-2.831, 2005.

- HAND, J.L., KREIDENWEIS, S.M., ELI SHERMAN, D., COLLETT JR., J.L., HERING, S.V., DAY, D.E., MALM, W.C. Aerosol size distributions and visibility estimates during the Big Bend Regional Aerosol and Visibility Observational (BRAVO) study. **Atmospheric Environment** 36, 5043–5055, 2002.
- HAY, J. E., HANSON, K. J., A satellite based methodology for determining solar irradiance at the ocean surface during GATE. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.59, p. 1549, 1978.
- HEGNER, H ET. AL., World Climate Research Program WRCP (WMO/ICSU/IOC). Baseline Surface Radiation Network (BSRN). **Update of the Technical Plan for BSRN Data Management**. World Radiation Monitoring Center (WRMC) Technical Report 2 version 1.0., 1998.
- HESS, M., KÖEPKE, P., SCHULT, I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. **Bull. Am. Met. Soc.** 79, 831–844, 1998.
- HINDS, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles**. Boston: John Willey and Sons Inc, 1982.
- HOELZEMANN, J. J., LONGO, K. M. ; FONSECA, R. M.; ROSÁRIO, N. M. E.; ELBERN,R; FREITAS, S. R.; PIRES, C. Regional representativity of AERONET observation sites during the biomass burning season in South America determined by correlation studies with MODIS Aerosol Optical Depth, **J. Geophys. Res.**, 114, D13301, 2009.
- HOLBEN, B. N., ECK, T. F., SLUTSKER, I., TANRÉ, D., BUIS, J. P., SETZER, A., VERMONTE, E., REAGAN, J. A., KAUFMAN, Y. J., NAKAJIMA, T., AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. **Remote Sens. Environ.**, vol. 66, p. 1-16, 1998.
- HOLBEN, B.N., SETZER, A., ECK, T.F., PEREIRA, A. E SLUTSKER, I. Effect of dry-season biomass burning on Amazon basin aerosol concentrations and optical properties, 1992-1994. **Journal of Geophysical Research**, 101 D14, 19465-19481, 1996.
- HUSAR, R. B., HUSAR, J. D., MARTIN, L., Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data. **Atmospheric Environment** 34, 5067-5078, 2000.
- ICHOKU, C.,CHU, DA; MATTOO, S; KAUFMAN, YJ; REMER, LA; TANRÉ, D; SLUTSKER, I; HOLBEN, BN: A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products, **Geophys. Res. Lett.**, 29(12), 8006, 2002.
- ICHOKU, C.; KAUFMAN, YJ; REMER, LA; LEVY, R: Global aerosol remote sensing from MODIS. **Adv. Space Res.**, 34, 820-827, 2004.
- INEICHEN, P. A broadband simplified version of the Solis clear sky model, **Solar Energy**, 82, 2008.
- (IPCC), I. P. on C. C. **Climate change 2001**: The third assessment report to the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, New York, 2001. 8.

(IPCC), I. P. on C. C. **Climate change 2007**: The fourth assessment report to the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, New York, 2007. 8, 9,11.

JACOBSON, M.Z. **Fundamentals of atmospheric modeling**, Cambridge. University Press, 828 p., 1999.

JAENICKE, R. Physical aspects of the atmospheric aerosol. In: Gerber, H. E.; Deepak, A. (ed.) **Aerosols and their climatic effects**. Hampton, A. Deepak Publishing, 1985.

JENNINGS, S. G. **Aerosol effects on climate**. Arizona: The University of Arizona Press, 1993.

JONES, P.D., **Observations from the surface: projection from traditional meteorological observations. World Survey of Climatology, vol. 16 - Future Climates of the World: A Modelling Perspective**. Editor: A. Henderson-Sellers. Elsevier, Amsterdam, Holanda, pp. 151-189, 1995.

KAUFMAN, Y. J.; HOLBEN, B. N.; TANRÉ, D.; WARD, D. E. Remote sensing of biomass burning in the Amazon. **Remote Sensing Reviews**, 10, 51-90. 1994.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. **Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Nasa mod04 product report**. 1998.

KAUFMAN, Y. J., TANRÉ, D., BOUCHER, O., A satellite view of aerosols in the climate system. **Nature**, vol. 419, 2002.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D.; REMER, L. A.; VERMOTE, E. F.; CHU, A.; HOLBEN, B. N.: Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research**, v.102, p.17.051–17.068, 1997.

KERSCHGENS, M.; PILZ, U.; RASCHKE, E. A modified two-stream approximation for computations of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere. **Tellus**, 30, 429-435, 1978.

KÖEPKE, P.; HESS, M.; SCHULT, I.; SHETTLE, E. P. **Global aerosol data set. Report number 243**. Hamburg: Max Planck Institut für Meteorologie, 1997.

KONDRATYEV, K. YA. **Radiation in the atmosphere**. New York: Academic Press, 1969.

KOTCHENRUTHER, R. A.; HOBBS, P. V. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, 103(D24), 32081-32089, 1998.

LANDULFO, E.; PAPAYANNIS, A.; FREITAS, A. Z. de; JR, N. D. V.; SOUZA, R. F.; GONÇALVES, A.; CASTANHO, A. D. A.; ARTAXO, P.; SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; MOREIRA, D. S.; JORGE, M. P. M. P. Tropospheric aerosol

observations in são paulo, brazil using a compact lidar system. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 13, 2005.

LARSON, S.M., CASS, G.R.,. Characteristics of summer midday low-visibility events in the Los Angeles area. **Environmental Science and Technology** 23, 281–289, 1989.

LECKNER, B. The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface elements of model, **Solar Energy** 20, pp. 143–150, 1978.

LENOBLE, J. The particulate matter from biomass burning: A tutorial and critical review of its radiative impact. In: **Global Biomass Burning - Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications**, editado por J.S. Levine, MIT Press, Cambridge, Mass., 381-386, 1991.

LENOBLE, J. **Atmospheric Radiative Transfer**. Virginia: A. Deepak Publishing, 1993.

LEVINE, J. S.; CAHOON, D. R. JR.; COSTULIS, J. A.; COUCH, R. H.; DAVIS, R. E.; GARN, P. A.; JALINK, A.; MCADOO, J. A.; ROBINSON, D. M.; ROETTKER, W. A.; SASAMOTO, W. A.; SHERRILL, R. T.; AND SMITH, K. D.: FireSat and the Global Monitoring of Biomass Burning. **Biomass Burning and Global Change**. The MIT Press, Inc., Cambridge, MA, pp. 107-129, 1996.

LEVY, R. C.; REMER, L. A.; KLEIDMAN, R. G.; MATTOO, S.; ICHOKU, C.; KAHN, R.; ECK, T. F.. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. **Atmos. Chem. Phys.**, 10, 10399-10420, 2010.

LIU, K.N. **An introduction to atmospheric radiation**. Academic Press, 1980. 391 p.

LONDON, J., BOJKOV, R. D., OLTMANS, S., KELLY J. I., Atlas of the global distribution of total ozone July 1957 – June 1967. **NCAR Tech. Note 133+STR**, p 276, Natl. Cent. For Atmos. Res., Boulder, Colorado, 1976.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; SILVA DIAS, M; SILVA DIAS, P.: Numerical modelling of the biomass-burning aerosol direct radiative effects on the thermodynamics structure of the atmosphere and convective precipitation. In: **International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO), 8, Foz do Iguaçu. Proceedings**. São José dos Campos, INPE, 121-129.

MARIANO, G. L., **Efeitos das queimadas na atmosfera do Estado de São Paulo - análise de fontes próximas e distantes através de LIDAR**. Tese de Doutorado - INPE, São José dos Campos, 2010.

McCLATCHEY, R. A., W. FENN, J. E. A. SELBY, F. E. VOLZ, AND J. S. GARIN,: **Optical properties of the atmosphere**. AFGL-71-0279, Air Force Cambridge Research Laboratories, 85pp, 1972.

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 - INPE, São José dos Campos, 2001.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., ABREU, S. L., BEYER, H. G., COLLE, S., PEREZ, R., HEINEMANN, D. Cross validation of satellite radiation transfer models during SWERA project in Brazil. **Proceedings of ISES Solar World Congress 2003-Solar Energy for Sustainable Future**, Goteborg, Suécia, 2003.

MARTINS, F., R., PEREIRA, E. B., ABREU, S., L., COLLE, S. Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, p. 3137-3145, 2005.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B.: Parameterization of aerosols from burning biomass in the Brazil-SR radiative transfer model. **Solar Energy**, v.80, p.231 - 239, 2006.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário - o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145 - 159, 2004.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., SILVA, S. A. B., ABREU, S. L., COLLE S.: Solar energy scenario in Brazil, Part one: Resource assessment. **Energy Policy**, v. 36, p. 2843-2854, 2008a.

MARTINS, F. R., RÜTHER, R., PEREIRA, E. B., ABREU, S. L.: Solar energy scenario in Brazil, Part two: Phtovoltaics applications. **Energy Policy**, v. 36, p. 2855-2867, 2008a.

MARTINS, F. R. E PEREIRA, E. B.: Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, p. 4378-4390, 2011.

MARTINS, J. V., ARTAXO, P., LIOUSEE, C., J. S. REID, HOBBS, P. V., KAUFMAN, Y. J. Effects of black carbon content, particle size and mixing on light absorption by aerosols from biomass burning in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, 103, p 32, 041 – 32 050, 1998.

MIRANDA, R.M., ANDRADE, M.F., WOROBIÉ A., GRIEKEN, R. V. Characterization of Aerosol Particles in São Paulo Metropolitan Area. **Atmospheric Environment** 36 345-352, 2002.

NADIERI, F. M., FREILICH, M. H., LONG, D.G., Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean – an overview of the NSCAT Scatterometer. **Proc. Ins. IEEE**, vol. 79, p. 850-866, 1991.

NOBRE, C. A.; MATTOS, L. F.; DERECZYNSKI, C. P.; TARASOVA, T. A.; TROSNIKOV, I. Overview of atmospheric conditions during the Smoke, Clouds and Radiation-Brazil (SCAR-B) field experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, 1998.

- NWOFOR, O.K.. Seasonal Levels of Meteorological Visibility at Port Harcourt Nigeria and Possible Links to Aerosol Loading and Humidification. **Pacific Journal of Science and Technology**. 11(2):544-551, 2010.
- PAN, L., GILLE, J.C., EDWARDS, D.P., BAILEY, P. L., RODGERS, C. D., Retrieval of tropospheric carbon monoxide of the MOPITT experiment. **Journal of Geophysical Research**, vol. 103, p. 32, 277-32, 290, 1998.
- PEREIRA, E. B.; COLLE, S. A energia que vem do Sol. **Revista Ciência Hoje**, 22, 130, 25-35, 1997.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; COUTO, P.; STUHLMANN, R. Biomass burning controlled modulation of solar radiation in Brazil. **Advanced Space Research**, 24, 7, 971-975, 1999.
- 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), 91–1072, 2000.
- PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE, São José dos Campos, 2006.
- PEREIRA, E.B.; SETZER, A.W.; GERAB, F.; ARTAXO, P. E.; PEREIRA, M.C.; MONROE, G.; Airborne measurements of burning of biomass aerosols in Brazil related to TRACE-A experiment. **Journal of Geophysical Research**, 101(D19),23983-2399, 1996.
- PEREZ R., P. INEICHEN, K. MOORE, M. KMIECIK, C. CHAIN, R. GEORGE AND F. VIGNOLA. A New Operational Satellite-to-Irradiance Model. **Solar Energy** 73, 5, 307-317P, 2002.
- 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.
- PEREZ, R. SEALS, R.; STEWART, R. Modelling irradiance on tilted planes: a simpler version of the Perez Model. **Proc. of ISES World Congress** em Hamburg, Alemanha, 1987.
- PEREZ, R., SEALS, R., ZELENKA, A., RENNÉ, D., The strengths of satellite based solar resource assessment. **Proceedings of ASES-97 Annual Meeting**. 1997.
- PIELKE, R.A., COTTON, W.R., WALKO, L.R., TREMBACK, C.J., LYONS, W.A., GRASSO, L.D., NICHOLLS, M.E., MORAN, M.D., WESLEY, D.A., LEE, T.J., COPELAND, J.H. A comprehensive meteorological modeling system-RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, p. 69–91, 1992.
- PINKER, R. E J. EWING: Modeling surface solar radiation: Model formulation and validation, **J. Climate Appl. Meteor.**, 24, 389-401, 1985.

- PINKER, R. T., LASZLO, I. On the use of climatological information in physical models for the surface insolation from satellites. **IRS'88 Current Problems**, 302-305, 1989.
- PINKER, R. T., LASZLO, I. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. **J. Appl. Meteorology**, 31, 194-211, 1992.
- POWER, H. C. The geography and climatology of aerosols. **Progress in Physical Geography**, 27; 502, DOI: 10.1191/0309133303pp393ra, 2003.
- PRINS, E., FELTZ, J., MENZEL, W.; WARD, D. An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America, **J. Geophys. Res.** 103, D24, 31821-31835, 1998.
- PROCÓPIO, A. L. A., REMER, P., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y.J., SCHAFER, J.S. Multiyear analysis of Amazonian Biomass Burning Smoke Radiative Forcing of Climate. **Geophysical Research Letters**, vol 31, doi:10.1029/2003GL018646, 2004.
- PROCÓPIO, A. L. A., REMER, P., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y.J., HOLBEN, B.N. Modeled spectral optical properties for smoke aerosols in Amazonia. **Geophysical Research Letters**, vol 30, doi:10.1029/2003GL018063, 2003.
- PROSPERO, J. M., CHARLESTON, R. J., MOHNEN, V., JAENICKE, R., DELANY, A. C., MOYERS, J., ZOLLER, W., RAHN, K. The atmospheric aerosol system: an overview. **Reviews of geophysics and space physics**, 21 (7), 1607 – 1629, 1983.
- RAES, F., DINGENEN, R. V., VIGNATI, E., WILSON, J., PUTAUD, J. P., SEINFELD, J. H., ADAMS, P. Formation and cycling of aerosols in the global troposphere. **Atmospheric Environment** 34, 4215-4240, 2000.
- RAPHAEL, C.; HAY, J. E. An assessment of models which use satellite data to estimate solar irradiance at the Earth's surface. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, 23, 832-844, May, 1984.
- RASCHKE, E. Multiple scattering calculations of the transfer of solar radiation in an atmosphere-ocean system. **Beitr. Phys. Atm**, 45,1-19, 1972
- REID, J. S.; HOBBS, P. V. Physical and optical properties of young smoke from individual biomass fires in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, 103(D24), 32013-32030, 1998.
- REID, J.S., HOBBS, P.V., FERREK, R.J., BLAKE, D.R., MARTINS, J.V., DUNLAP, M.R., LIOUSSE, C. Physical, chemical, and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil. **Journal of Geophysical Research** 103 D24, 32059-32080, 1998.
- REMER, L.A., KAUFMAN, Y.J., HOLBEN, B.N., THOMPSON, A.M. E MCNAMARA, D. Biomass burning aerosol size distribution and modeled optical properties. **Journal of Geophysical Research** 103 D4, 31879-31891, 1998.

RETALIS, A. AND MICHAELIDES, S.: Synergetic use of TERRA/MODIS imagery and meteorological data for studying aerosol dust events in Cyprus, **Int. J. Environ. Pollut.**, 36, 139–150, 2009.

RETALIS, A., HADJIMITSIS, D. G., MICHAELIDES, S., TYMVIOS, F., CHRYSOULAKIS, N., CLAYTON, C. R. I., AND THEMISTOCLEOUS, K.: Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 10, 421-428, doi:10.5194/nhess-10-421-2010, 2010

RIGOLLIER, C.; LEFREVE, M.; WAL, L. The method HELIOSAT-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. **Solar Energy**, 77:159-169, 2004.

ROSÁRIO, N. E. **Estudo da Variabilidade das Propriedades Ópticas dos Aerossóis sobre a América do Sul e dos Impactos do Efeito Radiativo Direto das Partículas de Queimadas**. Tese de Doutorado — Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2011.

RÜTHER, R., ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil, **Energy Policy**, 39, 3, 1027-1030, 2011.

SCHULTZ, M.G.; BACKMAN, L.; BALKANSKI, Y.;BJOERNDALSAETER, S.; BRAND, R.; BURROWS, J.P.; DALSOEREN, S.; VASCONCELOS, M. DE; GRODTMANN, B.; HAUGLUSTAINE, D.A.; HEIL, A.; HOELZEMANN, J.J.;ISAKSEN, I.S.A.; KAUROLA, J.; KNORR, W.; LADSTAETTERWEIßENMAYER,A.; MOTA, B.; OOM, D.; PACYNA, J.; PANASIUK, D.; PEREIRA, J.M.C.; PULLES, T.; PYLE, J.; RAST, S. , RICHTER, A.; SAVAGE, N.; SCHULZ, M.; SPESSA, A.; STAEHELIN, J.; SUNDET, J.K.; SZOPA, S., THONICKE, K.; VAN HET BOLSCHER, M.; VAN NOIJE, T.; VAN VELTHOVEN, P.; VIK, A.F.; WITTROCK, F. **Reanalysis of the Tropospheric chemical composition over the past 40 years (RETRO)** — a long-term global modeling study of tropospheric chemistry. Hamburg: Institute for Meteorology, 2007. Final Report. Report no. 48/2007 in the series Reports on Earth System Science, Max Planck.

SEINFELD, J.H., PANDIS, S.N., **Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change**. Wiley, New York, 1998.

SELBY I. E. A., MCCLATCHEY R. E. **Atmospheric transmittance from 0.25–28.5 μ m, computer code LOWTRAN 3**, AFCLR-TR- 75–0255, 1975.

SELBY, J. E. A.; SHETTTL, E. P.; MCCLATCHEY, R. A. **Atmospheric transmittance from 0,25 to 28,5mm: supplement LOWTRAN 3B (1976)**. Bedford, Massachusetts: Air Force Geophysics Laboratory, (AFGL-TR-76-0258), 79p, 1976.

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**, 1995

- SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C.; PEREIRA, A. C. Satellite studies of biomass burning in Amazonia – some practical aspects. **Remote Sensing Reviews**, 10, 91- 103. 1994.
- SILVA, A. A. **A espessura óptica de aerossóis na banda do UV-B**. Tese de Doutorado - INPE, São José dos Campos, 2001.
- SILVA, S. A. B., SIMÕES, P. M., MARTINS, F. R., PREREIRA, E. B. Aplicação da Geoestatística no Desenvolvimento de uma Base de Dados Climatológicos para Uso no Modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte. P. 1211-1218, 2003.
- SISLER, J.F., MALM, W.C.,. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States. **Atmospheric Environment** 28, 851–862, 1994.
- SMIRNOV, A.; HOLBEN, B.N.; ECK, T.F.; DUBOVICK, O.; SLUTSKER, I., Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. **Remote Sensing of the Environment**, vol. 73, p.337-349, 2000.
- STEPHENS, G. L. Radiation profiles in extended water clouds. I: theory. **Journal of Atmospheric Science**, 35,2111-2122, Novembro, 1978.
- STEPHENS, G. L. Radiation profiles in extended water clouds. II: parameterization schemes. **Journal of Atmospheric Science**, 35,2123-2132, Novembro, 1978.
- STUHLMANN, R., RIELAND, M., E. RASCHKE. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. **J. Appl. Meteor.** 29, 1990.
- TANRÉ, D.; KAUFMAN, Y.J.; HERMAN, M.; MATTOO, S., Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. **Journal of Geophysical Research**, v.102, p.16.971–16.988. 1997.
- TANRE, D, REMER, LA, KAUFMAN, YJ, MATTOO, S, HOBBS, PV, LIVINGSTON, JM, RUSSELL, PB, SMIRNOV, A. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution over ocean from the MODIS airborne simulator during TARFOX. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, 104(D2), 2261-2278, 1999.
- TARPLEY, J. D., Estimating incident solar radiation at the Earth's surface from geostationary satellite data. **J. Appl. Meteorology**, 18, 1172-1181, 1979.
- TOON, O.B. Modeling the relationships between aerosol properties and the direct and indirect effects of aerosols on climate. in: **Aerosol Forcing of Climate**. Editores: R.J. Charlson e J. Heintzenberg. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 198-213, 1995.
- TOON, O. B., MCKAY, C. P., ACKERMAN, T. P, SANTHANAM, K. Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres. **J. Geophys. Res.** 94:16287-16301, 1989.

- VERMOTE, E. F., VIBERT, S., KILCOYNE, H., HOYT, D., AND ZHAO, T.: Suspended Matter. Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite algorithm theoretical basis document. **SBRS Document # Y2390**, Raytheon Systems Company, Information Technology and Scientific Services, Maryland, 2002.
- VIANA, T. S., RÜTHER, R., MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B.: Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. **Solar Energy**, v. 85, p. 486-495, 2011.
- WARD, D. E.; SUSOTT, R. A.; KAUFFMANN, J. B.; BABBIT, R. E.; CUMMINS, D. L.; DIAS, B.; HOLBEN, B. N.; KAUFMAN, Y. J.; RASMUSSEN, R. A.; SETZER, A. W. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in brazil- base-b experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, 1992.
- WHITBY, K. T., LIU, B. Y. H., HUSAR, R. B., BARSIC, N. H. The Minnesota aerosol analyzing system used in the Los Angeles smog project. **J. Colloid Interface Sci.**, 39, 136-164, 1972a.
- WEBMET, **Quality Assurance and Quality Control**. The Meteorological Resource Center. Disponível em: http://webmet.com/met_monitoring/8.htm. Acesso em 12/10/2011.
- WHITBY, K. T., HUSAR, R. B., LIU, B. Y. H. The aerosol size distribution of Los Angeles smog. **J. Colloid Interface Sci.**, 39, 177-204, 1972b.
- WHITLOCK, C.H., TARPLEY, D. Satellite-Based solar radiation data archives and new data. In: **Proceedings of the workshop: Satellites for Solar Energy Resource Information**, Washington, Abril 10–11, 1996.
- WIELICKI, B. A., BARKSTORM, B. R., BAUM, B. A., CHERLOCK, T. P., GREEN, R. N., Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): Algorithm overview. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, vol. 36, p. 1127-1141, 1998.
- WMO, **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**, 6th Edition; loose-leaf. ISBN: 92- 63-16008-2, 1996.
- 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.

APÊNDICE A - MÉTODO DE DOIS-FLUXOS

O método de dois fluxos tem sido adotado por muitos autores para solucionar de forma rápida a equação de transferência radiativa, baseando-se na decomposição do campo de radiação em dois fluxos de radiação perpendiculares à superfície – um fluxo no sentido do topo da atmosfera e outro incidente na superfície.

Vamos assumir a geometria mais simples para o meio absorvedor/espalhador – geometria da atmosfera plana-paralela – onde as propriedades são constantes num plano paralelo aos contornos e a radiação incidente é constante nesses contornos. Esta é uma boa aproximação para a atmosfera planetária onde as variações verticais de todas as propriedades são muito mais rápidas do que as suas variações horizontais. (Lenoble, 1993). Nesta geometria, a posição do ponto M é descrita apenas por três variáveis: a altitude z , o ângulo zenital θ , e o ângulo azimutal ϕ . Dessa forma, a equação de transferência radiativa pode ser reescrita como:

$$\mu \frac{dL_\lambda(z; \mu, \phi)}{dz} = -\sigma_{e\lambda}(z) [L_\lambda(z; \mu, \phi) - J_\lambda(z; \mu, \phi)] \quad (\text{A.1})$$

e os termos fontes das equações como:

$$J_\lambda^{sc}(z; \mu, \phi) = \frac{\omega_\lambda(z)}{4\pi} \iint_{\text{espaço}} p_\lambda(z; \mu, \phi; \mu', \phi') L_\lambda(z; \mu', \phi') d\mu' d\phi'$$

$$J_\lambda^{em}(z; \mu, \phi) = [1 - \omega_\lambda(z)] L_\lambda^B(T(z)) \quad (\text{A.2})$$

onde $\mu = \cos \theta$. As condições de contorno são dadas para a radiância incidente no topo da atmosfera e para a radiância na superfície que “retorna”

para o espaço. É conveniente reescrever a equação (A.1) utilizando a espessura ótica vertical definida como $d\tau = \sigma_{e\lambda} dz$.

$$\mu \frac{dL_\lambda(\tau; \mu, \phi)}{d\tau} = -[L_\lambda(\tau; \mu, \phi) - J_\lambda(\tau; \mu, \phi)] \quad (\text{A.3})$$

A simplificação que torna a solução da equação de transferência radiativa mais simples do ponto de vista matemático é assumir que o fluxo de radiação vertical é independente do ângulo azimutal. Essa hipótese é válida quando a espessura ótica do meio é alta de modo que o feixe de radiação direta perde sua identidade devido ao espalhamento intenso. Este é o caso da atmosfera com nuvens espessas. Para minimizar os erros causados por esta simplificação, algumas alterações podem ser feitas como a introdução do fator de assimetria de espalhamento e de um parâmetro de retroespalhamento para parametrizar a função de fase do espalhamento. O código do BRASIL-SR utiliza o parâmetro de retroespalhamento e considera a dependência desse parâmetro em relação ao ângulo zenital solar. O algoritmo para aplicação do método de dois-fluxos no modelo BRASIL-SR segue o trabalho desenvolvido por Joseph et al. (1976). A função de fase do espalhamento adotado pelo modelo BRASIL-SR é idêntica à utilizada por esses autores.

Dessa forma, a equação de transferência radiativa escrita para os fluxos verticais é descrita por:

$$\begin{aligned} \frac{dF^+(\tau)}{d\tau} &= \alpha_1 F^+(\tau) - \alpha_2 F^-(\tau) - \alpha_3 \omega \pi F e^{-\tau/\mu} \\ \frac{dF^-(\tau)}{d\tau} &= \alpha_4 F^+(\tau) - \alpha_5 F^-(\tau) - \alpha_6 \omega \pi F e^{-\tau/\mu} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Onde:

$$F(\tau) = 2\pi \int_0^1 L(\tau, \mu) \mu d\mu$$

$$\alpha_1 = \frac{(1 - \omega(1 - \beta))}{\bar{\mu}^+}$$

$$\alpha_2 = \frac{\omega\beta}{\bar{\mu}^-}$$

$$\alpha_3 = \beta_0 S_0$$

$$\alpha_4 = \frac{\omega\beta}{\bar{\mu}^+}$$

$$\alpha_5 = \frac{(1 - \omega(1 - \beta))}{\bar{\mu}^-}$$

$$\alpha_7 = (1 - \beta_0) S_0 \tag{A.5}$$

sendo que β representa o coeficiente de retroespalhamento, β_0 o coeficiente de retroespalhamento no sentido contrário ao da incidência da radiação e ω é o albedo de espalhamento simples.