



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/12.03.12.37-TDI

**ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA DA RADIAÇÃO
SOLAR INFERIDA POR SATÉLITE VIA MODELO
GL1.2/CPTEC-INPE (1998-2017)**

Alan Dias Rodrigues

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Simone Marilene Sievert da Costa
Coelho, aprovada em 10 de outubro
de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UGCJT8>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/12.03.12.37-TDI

**ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA DA RADIAÇÃO
SOLAR INFERIDA POR SATÉLITE VIA MODELO
GL1.2/CPTEC-INPE (1998-2017)**

Alan Dias Rodrigues

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Simone Marilene Sievert da Costa
Coelho, aprovada em 10 de outubro
de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UGCJT8>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Rodrigues, Alan Dias.

R618a Análise da série histórica da radiação solar inferida por satélite via modelo GL1.2/CPTEC-INPE (1998-2017) / Alan Dias Rodrigues. – São José dos Campos : INPE, 2019.
xxvii + 136 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/12.03.12.37-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadora : Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho.

1. Análise de tendência. 2. Homogeneidade. 3. Radiação solar.
I.Título.

CDU 551.521.1



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Alan Dias Rodrigues**

Título: "ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA DA RADIAÇÃO SOLAR INFERIDA POR SATÉLITE VIA MODELO GL1.2/CPTEC-INPE (1998-2017)"

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

Meteorologia

Dr. Juan Carlos Ceballos



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Anthony Carlos Silva Porfírio

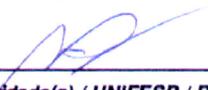


Membro da Banca / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Nilton Manuel Évora do Rosário

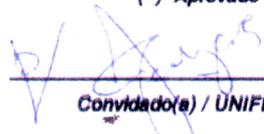


Convidado(a) / UNIFESP / Diadema - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dra. Elisa Thomé Sena



Convidado(a) / UNIFESP / São Paulo - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

“O sucesso de um líder é reconhecer o sucesso de seus liderados.”

(Autor desconhecido)

A Deus e a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar diante das dificuldades.

À minha família, pai, mãe, irmão e avó, que sempre me deram carinho e suporte. Foram eles que me ouviram e ajudaram em tudo que possível para que nunca desistisse de continuar estudando.

Em especial à Michelle Rodrigues, pelo incentivo, apoio e paciência que teve comigo, durante todo o período de realização do mestrado. E também ao Miguel Rodrigues, que foi motivo de grande motivação, vindo ao mundo poucos meses antes da defesa da dissertação.

À Professora, orientadora e, principalmente, uma grande amiga, Doutora Simone Sievert, meu muito obrigado de coração.

Aos amigos Doutor Dirceu Herdies, Doutor Nelson Ferreira, Doutor Juan Ceballos, Doutor Anthony Porfirio, e Mestre Joao Chinchay, que proporcionaram considerações, sugestões e auxílio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os meus amigos e amigas que conquistei no CPTEC-INPE, pois tiveram participação de forma direta ou indireta em todas as etapas do trabalho.

E, finalmente, a todos os técnicos e bolsistas que realizaram o processamento dos dados, durante as últimas duas décadas, utilizados neste trabalho, e também às redes observacionais que cederam os dados para este estudo.

RESUMO

Os dados da série de radiação solar descendente na superfície da DSA/CPTEC-INPE abrangem atualmente mais de 20 anos de informações sobre a América do Sul e são inferidos por satélites GOES por meio do Modelo GL1.2. Estas informações são úteis para diversos fins em variadas áreas, por exemplo, para agricultura, arquitetura, energia e meteorologia. Existem diagnósticos e validação deste modelo para períodos restritos de tempo, porém nada que contemple grande parte da extensa série temporal de dados (1998-2017). Os objetivos deste trabalho tiveram a finalidade de explorar os dados de radiação na superfície a partir de estudos de tendência, a fim de compreender o comportamento temporal da série, avaliação da homogeneidade e a estabilidade temporal, e avaliação da qualidade das estimativas por meio da comparação com dados observacionais *in situ*. Primeiramente, foi levantada uma série de 20 anos de dados de irradiância média mensal, a partir de dados diários, e realizada a verificação dos dados observacionais da rede SolRad-Net e SONDA. As estimativas por satélite GL1.2 foram comparadas com dados medidos nas estações e apresentam boa concordância com a verdade terrestre. Na base diária foi obtido erro médio de $8,4 \text{ W.m}^{-2}$, RMSE médio de $28,3 \text{ W.m}^{-2}$ e coeficiente de determinação médio de 0,85. Na escala mensal encontrou-se MBE, RMSE e R^2 de $8,7 \text{ W.m}^{-2}$, $19,2 \text{ W.m}^{-2}$ e 0,77, respectivamente. No geral, o modelo apresenta tendência em superestimar a verdade terrestre nas regiões norte, centro-oeste e nordeste por meio das comparações satélite-observações e de forma mais acentuada na região norte nos diagramas de dispersão. A comparação dos resultados do trabalho com outros estudos da literatura corrobora uma boa concordância tanto para escala diária quanto mensal. Os resultados de tendência pelo teste MK mostram que as estatísticas são dominadas por valores positivos não significativos e o Sen's slope aponta a existência de tendências de aumento na maioria das estações avaliadas (tendência de $1,47 \text{ W.m}^{-2}$ na média de todas as estações por duas décadas). A homogeneidade dos dados pelo teste SNHT infere que 53,3% dos 90 registros de magnitude máxima tiveram interferência relacionada a desgaste de sensores ou transição de satélites, 38,9% a efeitos do clima e tempo, e os demais não estiveram associados a impactos de sensor e clima. Os dados de irradiância média mensal indicam muito boa estabilidade temporal com mais de 82% das medidas realizadas do coeficiente em baixa variabilidade. Na análise da série histórica de 1998-2017 foi possível observar a partir do desvio padrão da anomalia padronizada haver ligeira tendência de aumento da irradiância média anual neste período e variações associadas a fenômenos climáticos. Além disso, a variabilidade interanual do estado climático da série influencia o nível de radiação solar que atinge a superfície e explica parte dos sinais encontrados na anomalia, tais como: regiões afetadas por seca e com excesso de chuva, ocasionado por impactos dos fenômenos ENOS. Os resultados sugerem que as estações da região norte, centro-oeste, sudeste e sul possuem homogeneidade nos dados depois de 2012. Em geral, os resultados obtidos na pesquisa foram consistentes e proporcionaram o entendimento do comportamento do modelo GL em um período de 20 anos, consequentemente a base de dados mostra boa confiabilidade dos dados de radiação solar.

Palavras-chave: Análise de Tendência. Homogeneidade. Radiação Solar.

ANALYSIS OF THE HISTORICAL SERIES OF SOLAR RADIATION INFERED BY SATELLITE VIA MODEL GL1.2 / CPTEC-INPE (1998-2017)

ABSTRACT

The data of the surface descent solar radiation series from the DSA/CPTEC-INPE cover currently more than 20 years of information about South America and are inferred by GOES satellites using the GL1.2 Model. This information is useful for several purposes in different application areas, for example, agriculture, architecture, energy and meteorology. There are GL1.2 model diagnoses and validation literature studies for restricted periods of time, but none of them cover the extensive temporal data series (1998-2017). This work aims to explore surface radiation data analysing temporal trends, homogeneity and temporal stability. Additionally, it evaluates the quality data by comparing with observational data in situ. Firstly, was collected a series of 20 years of monthly average irradiance data, from daily GL1.2 data, and compared with SolRad-Net and SONDA observational data. The estimates by satellite GL1.2 showed good agreement with terrestrial truth. On a daily basis were obtained average error of $8,4 \text{ W.m}^{-2}$, average RMSE of $28,3 \text{ W.m}^{-2}$ and average coefficient of determination of 0,85. In the monthly scale, it was found MBE, RMSE and R^2 of $8,7 \text{ W.m}^{-2}$, $19,2 \text{ W.m}^{-2}$ and 0,77, respectively. In general, the GL1.2 model tends to overestimate terrestrial truth in the north, midwest, and northeast regions and this overestimation is bigger in the north region. The results found here compared with other literature studies corroborates a good agreement for both daily and monthly scales. The trend results by the MK test show that the statistics are dominated by non-significant positive values and the Sen's slope points to increasing trends in most of the stations evaluated (trend of $1,47 \text{ W.m}^{-2}$ in average of all stations per two decades). The homogeneity of the data by the SNHT test infers that 53,3% of the 90 maximum magnitude records had interference related to sensor degradation or satellite transition, 38,9% to climate and weather effects, and the others were not associated with sensor and climate impacts. The average monthly irradiance data indicate very good temporal stability with more than 82% of the measures performed with coefficient at low variability. In the analysis of the historical series of 1998-2017, it was possible to observe from the standard deviation of the standard anomaly to have a slight tendency of increase of the annual average irradiance in this period and variations associated with climatic phenomena. In addition, the interannual variability of the climatic state of the series influences the level of solar radiation that reaches the surface and explains some of the signs found in the anomaly, such as: regions affected by drought and excess rainfall, caused by impacts of ENSO phenomena. The results suggest that the north, midwest, southeast and south stations have homogeneity in data after 2012. In general, the results obtained in the survey were consistent and provided an understanding of the behavior of the GL model over a period of 20 years, consequently the database shows good reliability of solar radiation data.

Keywords: Trend Analysis. Homogeneity. Solar Radiation.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Balanço de energia global ($W.m^{-2}$) do sistema Terra-atmosfera. As setas indicam o fluxo esquemático da energia.	11
Figura 2.2 - Campos gerados com dados do modelo GL1.2 ($W.m^{-2}$): (a) média mensal e (b) desvio padrão, da radiação diária para o mês de julho de 2017.	18
Figura 3.1 - Quantitativo de arquivos diários do modelo nos meses do período entre 1998 e 2017: 1 mês (nenhum dado), 3 meses (entre 1 e 20 dias de dados), 11 meses (entre 21 e 25 dias de dados), 88 meses (superior 26 dias, porém mês incompleto de dados) e 137 meses (completo).	34
Figura 3.2 - Mapa de Biomas do Brasil e a localização das estações da rede SolRad-Net e SONDA.	35
Figura 3.3 - Filtros aplicados no controle de qualidade dos dados observacionais da rede SONDA e SolRad-Net e dos dados do modelo GL. Considerando: GL – modelo GL, OBS – observacional, HS – hora solar.	42
Figura 4.1 - Quantidade de dados diários do modelo GL. Os rótulos são o total de dados filtrados conforme discutido na Seção 3.1.5 e a escala do percentual de dados aprovados é apresentada de 90 a 100%. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.4.	57
Figura 4.2 - Percentual de dados diários observados de radiação solar nas estações de superfície. Considerando que os dados aprovados na rede (após Filtros R e 1) são 100% e que no Filtro 5 estão somente os dados diários possíveis de serem comparados mensalmente com os do GL. Os rótulos são o total de dados disponíveis (100%). Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.4.	58
Figura 4.3 - Quantidade de dados mensais de radiação solar observado para cada estação. Considerando que o total de meses com arquivos disponíveis na rede são 100%, após Filtros R e 1. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.5.	58

Figura 4.4 - Média e DP da irradiância solar média em 20 anos do modelo GL utilizando dados diários. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.6.	60
Figura 4.5 - Média e DP da irradiância solar média diária no período de 20 anos separada por mês em cada região. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.6.	61
Figura 4.6 - Valores de MBE, MAE e RMSE na análise dos dados do GL com dados diários nas estações de superfície. A linha em tracejado indica o valor médio de todas as estações. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.	65
Figura 4.7 - Estatísticas dos coeficientes de determinação diários nas estações de superfície. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.	66
Figura 4.8 - Histogramas do desvio entre a irradiância solar diária estimada pelo modelo GL e a medida obtida por algumas estações analisadas das redes SolRad-Net e SONDA para cada região do Brasil. A curva tracejada indica a frequência acumulada da amostra utilizada na comparação. Ver os resultados de histogramas das outras estações no Apêndice Figura A.1. ..	67
Figura 4.9 - Diagramas de dispersão entre os valores de irradiância solar diária observados e modelados em 10 estações das redes SolRad-Net e SONDA para cada região do país. A reta tracejada indica a linha de tendência. Ver os resultados de dispersão das outras estações no Apêndice Figura A.1. ..	68
Figura 4.10 - Valores de MBE, MAE e RMSE da análise dos dados do GL com dados mensais nas estações de superfície. A linha em tracejado indica o valor médio de todas as estações. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.	72
Figura 4.11 - Estatísticas dos coeficientes de determinação usando dados mensais. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.	73
Figura 4.12 - Diagramas de dispersão entre os valores de irradiância solar média mensal observados e modelados em 10 estações das redes SolRad-Net e SONDA para cada região do país. Ver os resultados de dispersão das outras estações no Apêndice Figura A.2.	74

Figura 4.13 - Comparação temporal da irradiância média mensal (com dados diários) entre a estimativa do modelo GL e a medida à superfície. Ver as comparações das outras estações no Apêndice Figura A.3.	75
Figura 4.14 - Série temporal da diferença da irradiância média mensal do modelo GL e o valor obtido em superfície. Linha tracejada indica a média da diferença. Ver as séries temporais das outras estações no Apêndice Figura A.3.....	76
Figura 4.15 - Resultados do estudo de simulação para demonstração do desempenho do teste SNHT. A linha vertical tracejada em vermelho representa a estatística máxima de SNHT computada nos dados. A linha horizontal em azul indica o limiar do nível de confiança para o teste. Ver os resultados do SNHT das outras estações no Apêndice Figura A.3.	83
Figura 4.16 - Localização temporal dos mais elevados picos de não homogeneidade nas estações no período de 20 anos, por meio do SNHT. As barras em vermelho indicam época de mudança de satélites e os retângulos em preto períodos associados a fenômenos climáticos.	85
Figura 4.17 - Percentual do coeficiente de variação em cada uma das estações.	86
Figura 4.18 - Composição da base histórica do modelo GL1.2 com dados de irradiância média mensal a partir de dados diários no período entre 1998 e 2017. As barras em vermelho indicam época de mudança de satélites. Posição latitude-longitude da estação Cuiabá-Miranda. Ver as composições das outras estações no Apêndice Figura A.3.	91
Figura 4.19 - Série da média anual do modelo GL expressa como anomalia em (DP) de 1998 a 2017. Anomalia sendo: (a) em todas as estações, (b) por regiões e (c) média de todas as regiões do Brasil. Os retângulos em preto representam períodos associados a fenômenos climáticos.	92

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Lista das variáveis essenciais climáticas e seus domínios geofísicos.	9
Tabela 2.2 - Descrição dos dados de radiação solar de diferentes produtos. São inseridos a fonte, resolução espacial, resolução temporal, período, características físicas e referência.	19
Tabela 3.1 - Satélites da série GOES e respectivos início e fim dos períodos operacionais restrito aos 20 anos de estudo (1998-2017) da série histórica.	32
Tabela 3.2 - Levantamento estatístico da quantidade de dos arquivos diários disponíveis para cada mês no período dos 20 anos de estudo da série histórica. O mês de fevereiro de 2012 não havia arquivos diários no banco de dados disponível.	33
Tabela 3.3 - Informações sobre as características gerais das estações: localização (ver disposição na Figura 3.2), rede e período de dados; e levantamento estatísticos de meses com dados: (a) quantidade de meses com arquivos disponíveis na rede (possível de ser utilizado) e (b) quantidade de meses utilizados na comparação com dados de estimativa de satélite (validação - Seção 3.2). O Apêndice Tabela A.3 apresenta dados mais detalhados dos períodos de funcionamento de cada estação.	36
Tabela 3.4 - Período com pares anuais e intensidades dos eventos El Niño e La Niña. Linhas sem informação referem-se aos anos neutros.	54
Tabela 4.1 - MBE e RMSE obtidos em estudos anteriores de estimativas da irradiância solar e do atual estudo no contexto de avaliação do GL.	77
Tabela 4.2 - Valores de R^2 , MBE, RMSE e SDD de irradiância solar incidente à superfície para cada região brasileira.	78
Tabela 4.3 - Estatísticas dos testes de tendência MK, Sen's slope e t de Student para estimativas da radiação com dados do GL1.2 nas estações e respectivas regiões do Brasil. Considerando que: NS – Não Significativo, S –	

Significativo, NHDS – Não há diferença significativa entre as médias e
HDS – Há diferença significativa entre as médias.81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AERONET	Aerosol Robotic Network
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CLARA	Clouds, Albedo and Radiation
CM-SAF	Satellite Application Facility on Climate Monitoring
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DP	Desvio Padrão
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
ECMWF	European Center for Medium Range Forecasting
ECV	Essential Climate Variable
ENOS	El Niño Oscilação Sul
EOS	Earth Observing System
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FIRE	First ISCCP Regional Experiment
GEBA	Global Energy Balance Archive
GISS	Goddard Institute for Space Studies
GL	Modelo GL
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GMS	Geostationary Meteorological Satellite
GSFC	Goddard Space Flight Center
HC	HelioClim
IGMK	Institut für Geophysik und Meteorologie - Universität zu Köln
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INSAT	Indian National Satellite System
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
JPSS	Joint Polar Satellite System
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
MACC	Monitoring Atmospheric Composition and Climate
MAE	Mean Absolute Error

MAGIC	Mesoscale Atmospheric Global Irradiance Code
MBE	Mean Bias Error
MERRA	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications
MK	Mann-Kendall
MSG	Meteosat Second Generation
MVIRI	Meteosat Visible and InfraRed Imager
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NIR	Infravermelho Próximo
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
R ²	Coefficiente de Determinação
RMSE	Root Mean Square Error
SARAH	Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat
SBDART	Santa Bárbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer
SCD	Satélite de Coleta de Dados
SDD	Standard Deviation Difference
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SINDA	Sistemas Integrados de Dados Ambientais
SNHT	Teste de Homogeneidade Normal Padrão
SolRad-Net	Solar Radiation Network
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
TOA	Top Of Atmosphere
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TOGA-COARE	Tropical Ocean - Global Atmosphere / Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USA	United States of America
UV	Ultravioleta
VAR	Variância
VIS	Visível
WMO	World Meteorological Organization

WRMC World Radiation Monitoring Center
ZCIT Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização do tópico a ser estudado	1
1.2. Motivação	3
1.3. Objetivo	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Radiação solar incidente à superfície definida como uma variável climática essencial	7
2.2. Conceitos básicos da interação da radiação solar com a atmosfera.....	9
2.3. Fontes de dados de radiação solar	11
2.3.1. Dados observacionais no Brasil	11
2.3.2. Séries históricas de radiação solar inferidas a partir de dados de satélites .	13
2.4. Estudos de avaliação de séries históricas consolidadas de radiação solar via satélite.....	20
2.5. Modelo GL1.2	25
2.5.1. Radiação no espectro visível	27
2.5.2. Radiação no espectro ultravioleta	27
2.5.3. Radiação no espectro infravermelho solar	28
3. DADOS E METODOLOGIA	30
3.1. Dados de radiação	30
3.1.1. Levantamento de dados disponíveis na base histórica de satélite (modelo GL1.2/CPTEC)	31
3.1.2. Levantamento de dados observacionais de superfície disponíveis.....	34
3.1.3. Rede SolRad-Net	37
3.1.4. Rede SONDA	38
3.1.5. Controle de qualidade dos dados de radiação adotado no presente estudo .	40
3.2. Comparação entre dados do GL1.2 e observacionais	43
3.3. Testes estatísticos para análise da variabilidade temporal de radiação solar	44
3.3.1. Teste de tendência	45

3.3.2. Teste de magnitude de tendência	47
3.3.3. Teste t de Student	48
3.3.4. Teste de homogeneidade	49
3.4. Estimativa de anomalia padronizada da série histórica temporal do GL1.2.....	50
4. RESULTADOS	55
4.1. Análise da disponibilidade dos dados de radiação	55
4.2. Avaliação dos dados de irradiância estimados pelo GL	59
4.2.1. Análise na escala diária	59
4.2.2. Análise na escala mensal	69
4.2.3. Análise comparativa dos resultados da avaliação	77
4.3. Análise de tendência, da magnitude de tendência e de t de Student	79
4.4. Análise de homogeneidade	81
4.5. Avaliação da série histórica	87
5. CONCLUSÕES	93
5.1. Sugestões para futuros trabalhos	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE A – RESULTADOS COMPLEMENTARES	106
Tabela A.1. Relatório Geral de Dados Disponíveis do GL 1.2	106
Tabela A.2. Relatório Geral de Dados Disponíveis de Superfície	107
Tabela A.3. Período completo de dados disponíveis nas estações	108
Tabela A.4. Estatística completa da quantidade de dados diários do modelo GL e dos dados observacionais nas estações	109
Tabela A.5. Estatística completa da quantidade de dados mensais do modelo GL e dos dados observacionais nas estações	110
Tabela A.6. Média e desvio padrão com dados diários do modelo GL nas estações ...	111
Tabela A.7. Resultados de MBE, MAE, RMSE, R ² e SDD dos dados diários e mensais, comparativo entre o GL e a verdade terrestre	113
Figura A.1. Histogramas dos desvios e diagramas de dispersão com resultados de dados diários de outras estações estudadas	115
Figura A.2. Diagramas de dispersão com resultados de dados mensais de outras estações estudadas	119

Figura A.3. Resultados adicionais de comparações, séries temporais, SNHT e composições da base histórica	121
--	-----

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho visa explorar a série temporal histórica de 20 anos dos dados de radiação solar da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Estes dados são estimados a partir do uso de imagens de satélites geoestacionários da série GOES leste, que operam na América do Sul. O estudo tem basicamente o propósito de examinar qualitativa e quantitativamente os dados levantados por meio de comparação com dados observacionais *in situ*, bem como avaliar a homogeneidade, a estabilidade e a tendência destes dados.

Sendo assim, uma das finalidades do teste de homogeneidade é verificar se no período de transição dos satélites, por exemplo, não houveram mudanças bruscas na quantidade de radiação associada à operação de migração de informações satelitais. Uma série homogênea é definida como aquela em que a variabilidade e as mudanças são causadas apenas por variações referentes ao comportamento da atmosfera, isto é, do clima.

Com relação à estabilidade temporal de um conjunto de dados, é necessário o atendimento de duas condições para contextualização e análise. A primeira é haver um número suficiente de observações em determinado período de tempo para obtenção das medidas estatísticas e a segunda é a possibilidade de associação de cada posição com seu valor estatístico de densidade de probabilidade de distribuição normal (MELO FILHO; LIBARD, 2005).

Neste capítulo são apresentados a contextualização, motivação e objetivos do presente estudo.

1.1. Contextualização do tópico a ser estudado

A radiação solar a principal fonte de energia do planeta, sendo fundamental nos processos fotoquímicos, térmicos e dinâmicos da natureza. Adicionalmente, a radiação solar é uma fonte renovável de energia. Sendo assim, informações sobre a quantidade de radiação solar incidente na superfície desempenham papel fundamental em muitas

atividades humanas como, por exemplo, a agricultura, a arquitetura, o planejamento energético (MARTINS et al., 2004) e a meteorologia. Ademais, a variabilidade da radiação solar pode ser um indicador de mudanças climáticas (LOHMANN et al., 2006).

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), as componentes do balanço de radiação compõem um conjunto de variáveis climáticas essenciais para monitorar o clima a longo prazo (WMO, 1966). Neste contexto, séries históricas e o monitoramento contínuo da radiação solar e terrestre são importantes para caracterizar o clima.

No Brasil existem três fontes de dados observacionais *in situ* de radiação. As duas principais operadas por instituições nacionais são: o banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a rede solarimétrica do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), que possuem dados coletados em estações de medição distribuídas por todo o território brasileiro. Adicionalmente, a agência americana *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) disponibiliza um banco de dados de radiação solar por meio de uma rede internacional denominada *Solar Radiation Network* (SolRad-Net). Esta rede é uma extensão e utiliza estações das redes de aerossol de sensoriamento remoto do projeto *Aerosol Robotic Network* (AERONET) e possui sua instrumentação preferencialmente situada em locais que monitoram a queima de biomassa, como a Amazônia. As redes SONDA e SolRad-Net são utilizadas neste trabalho. Os dados observacionais foram restringidos nestas redes por causa das informações detalhadas do tipo de instrumentação e calibração periódica dos instrumentos.

Apesar do grande número de dados de estações observacionais sobre o Brasil, as redes são descontínuas (longos períodos com dados faltantes) e esparsas, não sendo suficientemente densas para cobrir todas as regiões de interesse. Adicionalmente, no Brasil, poucas redes de observação apresentam informações detalhadas sobre o tipo, marca e períodos de metadados sobre a manutenção dos radiômetros e o controle de qualidade dos dados, tornando limitado o uso das observações de radiação para períodos longos.

Outra fonte importante de dados de radiação solar são aqueles obtidos usando informações de sensores orbitais. Atualmente, existem no Brasil duas bases de dados de radiação solar inferidos a partir de dados do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), ambos gerados no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O primeiro é o Atlas Solarimétrico, o qual é constituído com base em dados dos satélites da série GOES e no modelo físico de transferência radiativa BRASIL-SR. O Atlas Brasileiro de Energia Solar consiste de um compacto com mapas de irradiação de médias mensais e anual no período de 1999-2015, de crescente importância para aprovisionar parte da demanda de dados, do levantamento e da disponibilidade de energia solar no território brasileiro (PEREIRA et al., 2017). O segundo produto é a radiação solar determinada por meio do modelo GL (de radiação GLobal), objeto de pesquisa deste estudo, que foi desenvolvido na DSA do CPTEC para realizar estimativas por meio de imagens do canal visível (VIS) do sensor denominado IMAGER, do satélite geostacionário GOES. A DSA/CPTEC-INPE possui um acervo histórico de dados, sendo uma série temporal composta por informações desde outubro de 1997. Este produto é gerado continuamente até a presente data, constituindo assim uma série de mais de 20 anos (no presente, 22 anos). Este conjunto de dados contempla informações úteis para diversos estudos climáticos, de agrometeorologia, de hidrologia, e que englobam potencial energético solar. No entanto, este estudo foi limitado ao período de janeiro de 1998 à dezembro de 2017. A escolha desse período deve-se ao fato de incluir anos completos e que o sistema de informações constituísse o produto anterior à nova geração de sensores avançados do GOES leste. Essa nova geração, com sensor imageadores avançado, teve seu primeiro lançamento (GOES-R atualmente GOES-16) em novembro de 2016, porém os produtos de radiação começaram a ser processados em novembro de 2017. No período de transição do GOES-13 para GOES-16 (novembro e dezembro 2017), os produtos foram gerados para ambas plataformas.

1.2. Motivação

O banco de dados de radiação solar da DSA/CPTEC-INPE é constituído por informações provenientes de diferentes satélites GOES que operam no setor leste desde

1997 (entre -60° e -75° de longitude) destacando-se GOES-8, GOES-10, GOES-12 e GOES-13.

O GL versão 1.2 é um modelo físico brasileiro de estimativa da irradiação solar global à superfície (detalhes na Seção 2.5), trata-se de uma ferramenta operacional e de acesso livre na forma de pântadas e médias mensais (seus produtos estão disponíveis em <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/>). Esta versão foi utilizada para produzir a primeira série de radiação solar global à superfície, a mais longa série de dados em alta resolução espacial e temporal produzida no país.

Uma das vantagens da série histórica de dados de radiação da DSA/CPTEC-INPE produzida pelo GL1.2 é a alta resolução espacial de $0,04^\circ \times 0,04^\circ$. Alguns estudos avaliaram as estimativas de radiação do modelo GL por meio de comparação com estações *in situ*, porém para períodos de tempo curtos e localidades específicas. Dentre vários exemplos, alguns apreciáveis são: Ortega et al. (2008) realizaram uma comparação no período de 1 ano de uma base de dados de irradiação solar no Chile com estimativas inferidas por satélite por meio do modelo GL (entre março de 1995 e dezembro de 2006); o estudo de Ceballos et al. (2011), efetuaram uma comparação entre valores estimados por satélite e medidos por uma rede solarimétrica no trimestre outubro-dezembro de 2010 na província de Tucumán na Argentina; o relatório técnico de Ceballos et al. (2011), verificaram o comportamento do modelo de estimativa de radiação solar GL1.2 em comparação com dados de superfície de redes de medição na América do Sul entre 10 e 12/2010; Porfirio e Ceballos (2014), usaram o modelo GL na comparação de estimativas de radiação solar global com medidas à superfície para o período de 07/2008 a 12/2008 no nordeste brasileiro; e Britto et al. (2016) validaram o modelo de radiação solar GL1.2 com os dados da rede automática do INMET para o período de janeiro a junho de 2016. Porfirio et al. (2019) realizaram uma análise detalhada estendida do desempenho do modelo GL1.2 utilizando a rede do INMET para o ano de 2016. No Capítulo 2 serão mencionados resultados obtidos por alguns dos estudos destacados acima.

Neste âmbito, o presente trabalho teve como um dos objetivos principais estender a análise do desempenho do modelo GL1.2, utilizando a série histórica de 20 anos de dados (1998-2017) de irradiância solar incidente à superfície. Além disso, é inédito o uso de uma série de 20 anos sobre o território brasileiro, tanto para estudo de avaliação, como na análise de homogeneidade e estabilidade estatística.

1.3. Objetivo

O objetivo principal deste estudo é examinar qualitativa e quantitativamente os dados de irradiância solar global incidente à superfície da série histórica de 20 anos (1998-2017) do GL1.2, bem como avaliar a homogeneidade, a estabilidade e a tendência destes dados.

Sendo assim, o desenvolvimento da pesquisa propõe a abordagem dos seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a qualidade das estimativas de radiação solar da DSA a partir da comparação com dados observacionais *in situ*, avaliação que será fundamental para delimitar o nível de qualidade do produto de radiação solar, principalmente em termos da série histórica;
- Realizar uma análise temporal da série histórica de radiação solar no Brasil, avaliando a homogeneidade dos dados e a estabilidade temporal, principalmente nas datas de transição dos satélites;
- Realizar estudos de tendência, a fim de compreender o comportamento temporal da série, bem como identificar possíveis variações temporais na radiação e causas climáticas associadas.

Espera-se que os resultados encontrados possam compor um conjunto de informações úteis a diferentes usuários interessados na série histórica de dados do GL1.2. O presente documento está dividido em cinco capítulos. O segundo apresenta a revisão bibliográfica para fundamentação da dissertação. No Capítulo 3 são apresentados os

dados e a metodologia aplicada, ao passo que o Capítulo 4 apresenta os resultados. As conclusões da pesquisa encontram-se no Capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo, serão apresentados alguns aspectos teóricos importantes para a fundamentação do trabalho e também resultados científicos encontrados por outros autores no tema desta pesquisa.

2.1. Radiação solar incidente à superfície definida como uma variável climática essencial

A OMM reconhece a componente radiação solar incidente à superfície como uma das variáveis atmosféricas importantes para monitorar o clima da Terra (BOJINSKI et al., 2014). As variáveis atmosféricas (Tabela 2.1), juntamente com as oceânicas e as da superfície terrestre, são designadas de variáveis climáticas essenciais (ECV, em inglês *Essencial Climate Variable*). A definição ECV contempla o aspecto multidisciplinar e permite ser utilizada no âmbito científico auxiliando nos estudos relacionados ao clima do planeta. Segundo a OMM, a classificação das ECVs é baseada em 3 critérios: relevância, viabilidade e custo-benefício, que são parâmetros fundamentais para a diretiva de discussão dos desafios e oportunidades atreladas às variáveis. Dados de superfície e de satélite são importantes para monitoramento destas variáveis, sendo assim, existem alguns aspectos inerentes à base de dados a serem considerados. Entre estes critérios pode-se mencionar qualidade, confiabilidade e homogeneidade. Avaliar o comportamento de uma variável climática em termos de tendência e homogeneidade, como pretendido por esta pesquisa, é importante principalmente para estudos de caracterização do sistema climático e uso de séries de dados de radiação em atividades como agricultura e geração de energia. No caso da radiação solar à superfície, o estudo da variabilidade pode indicar mudanças no estado físico da atmosfera, mudanças nas características de nuvens, concentração de gases e presença de aerossóis na atmosfera (BELWARD, 2016). Os efeitos destas componentes atmosféricas na radiação solar serão descritos na próxima seção.

Alguns estudos associados ao monitoramento mostram um aumento ou decréscimo dos níveis de radiação solar na superfície. *Global dimming* (escurecimento global) é o

decréscimo gradual na quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre, e alguns autores afirmam com base em resultados de pesquisas haver uma elevada correlação entre as variações meteorológicas e o fenômeno, por exemplo Ramanathan (2007) e Yang et al. (2013) (BEZERRA; DA SILVA, 2013). Segundo Pinker et al. (2005) o escurecimento global a longo prazo é um alerta por causa de suas possíveis implicações climáticas e ambientais, principalmente no contexto das mudanças climáticas. Por outro lado, o conceito *global brightening* (clareamento global) está associado ao aumento da radiação solar à superfície.

Decréscimo ou aumento da irradiação solar à superfície devem-se a alterações na quantidade de radiação solar incidente no topo da atmosfera (TOA, do inglês *Top Of Atmosphere*) procedente dos parâmetros orbitais da Terra e da emissão solar. Outro fator constatado são as alterações na transparência da atmosfera à radiação solar, que podem ser decorrentes da dispersão e variação da profundidade óptica de partículas de aerossóis na atmosfera, de mudanças relacionadas às características das nuvens. Adicionalmente, pode também ser pela diminuição da quantidade de radiação após explosões de erupções vulcânicas. Contudo, indicação de escurecimento também pode ser proveniente de deficiência de instrumentos, devido ao envelhecimento ou falta de manutenção dos mesmos (CECONI, 2013; PINKER et al., 2005). Em termos da América do Sul, existem poucos estudos que avaliam tendências dos fluxos radiativos à superfície, como será apresentado na Seção 2.4.

Tabela 2.1 - Lista das variáveis essenciais climáticas e seus domínios geofísicos.

Atmosférica	<p>Superfície: Temperatura do ar, velocidade do vento, vapor d'água, pressão, precipitação, balanço da radiação superficial</p> <p>Ar superior: Temperatura, velocidade e direção do vento, vapor d'água, propriedades das nuvens, balanço de radiação da Terra (incluindo irradiância solar)</p> <p>Composição: Dióxido de carbono, metano, outros gases de efeito estufa de longa duração, ozônio e aerossol suportados por seus precursores</p>
Oceânica	<p>Superfície: Temperatura da superfície do mar, salinidade da superfície do mar, nível do mar, estado do mar, gelo marinho, corrente de superfície, cor do oceano, pressão parcial de dióxido de carbono, acidez do oceano, fitoplâncton</p> <p>Subsuperfície: Temperatura, salinidade, corrente, nutrientes, pressão parcial de dióxido de carbono, acidez do oceano, oxigênio</p>
Terrestre	<p>Descarga de rios, uso da água, águas subterrâneas, lagos, cobertura de neve, geleiras e calotas polares, cobertura de gelo, gelos permanentes de subsolo, albedo, cobertura terrestre (incluindo tipo de vegetação), fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida, índice de área de folhagem, biomassa acima do solo, carbono do solo, distúrbios de incêndio, umidade do solo</p>

Fonte: Adaptada de Bojinski et al. (2014).

2.2. Conceitos básicos da interação da radiação solar com a atmosfera

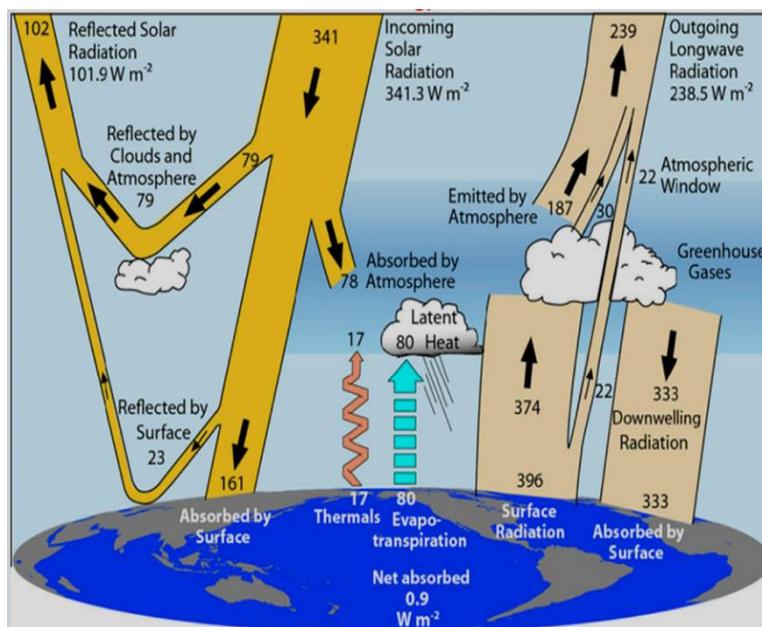
O balanço de radiação do sistema terrestre consiste na relação entre a quantidade de radiação que incide e emerge do sistema. Sabe-se que o balanço de energia atrelado aos fluxos de calor latente e sensível tem importante papel nos ciclos que ocorrem na superfície do planeta, por exemplo o ciclo hidrológico. As principais interações da radiação solar e da radiação terrestre com a atmosfera e superfície encontram-se representadas pelas setas na Figura 2.1. Esta figura também apresenta valores de irradiância média global de cada um dos componentes do balanço de radiação (TRENBERTH et al., 2009). Estes valores foram estimados a partir de observações de superfície, satélites e cálculos de transferência radiativa. De maneira resumida, observa-se que uma parte da radiação solar incidente no planeta é refletida de volta para o espaço pela atmosfera / nuvens e pela superfície (a fração da radiação solar refletida para o espaço e a radiação incidente descrevem o albedo planetário). Outra parte da radiação solar incidente sofre os processos de absorção e espalhamento dentro da atmosfera. O espalhamento ocorre dentro da atmosfera pelas moléculas de ar, principalmente O₂ e N₂, e pelas partículas de nuvens. Ainda, parte da radiação solar pode ser absorvida por gases (O₂, O₃, CO₂ e vapor d'água) e pelas nuvens. Após atravessar a atmosfera, parte da radiação solar é absorvida pela superfície, provocando o

aquecimento da superfície do planeta, que emite de radiação em comprimentos de ondas maiores (radiação terrestre ou onda longa) na direção da atmosfera. Os aerossóis podem absorver ou espalhar radiação solar e terrestre dependendo de sua composição química e tamanho.

O transporte e a interação de energia da radiação solar e terrestre com o sistema Terra-atmosfera são descritos pelas leis de transferência radiativa. Na maioria das aplicações meteorológicas, a energia é representada em termos da irradiância (ou densidade de fluxo), a qual descreve a quantidade de energia radiante que atravessa uma superfície por unidade de tempo e a área desta (unidade $W.m^{-2}$, onde W é dado por $J.s^{-1}$) (PETTY, 2008).

A irradiância pode ser medida à superfície por instrumentos genericamente conhecidos como radiômetros, instalados no solo, por modelos numéricos, por modelagem empírica, ou ainda inferida a partir do uso de imagens de satélites geoestacionários ou polares com alta resolução espacial e temporal (maiores detalhes na Seção 2.3.2). O presente estudo visa utilizar ambas fontes de dados de radiação como foi apresentado na introdução e será detalhado nas próximas seções.

Figura 2.1 - Balanço de energia global ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) do sistema Terra-atmosfera. As setas indicam o fluxo esquemático da energia.



Fonte: Trenberth et al. (2009).

2.3. Fontes de dados de radiação solar

2.3.1. Dados observacionais no Brasil

O INMET é um órgão federal criado em 1909 com a missão de proporcionar informações meteorológicas à sociedade e contribuir para o desenvolvimento sustentável da nação.

O sistema de coleta e distribuição de dados do INMET inclui vários sensores que registram os parâmetros meteorológicos, tais como: temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento, radiação solar, precipitação, entre outras variáveis. Esta estrutura organizacional é composta de estações de radiossondagem, estações convencionais, e a maior rede de estações meteorológicas automáticas da América do Sul. Outro diferencial das estações operadas pelo INMET é a robusta disponibilidade de dados do referido instituto para o território nacional, que

aumenta a abrangência de informações para desenvolvimento de estudos climáticos (ver em <http://www.inmet.gov.br/portal/>).

A rede SONDA é uma base de dados que foi criada a partir de um projeto do INPE e conta com a colaboração de vários institutos de pesquisa e universidades do Brasil. Em operação desde 2004, seu objetivo foi obter melhorias na base de dados dos recursos de energia solar e eólica no Brasil, tendo distribuído estações com representação de diferentes características climáticas do território brasileiro. Os dados disponibilizados nas estações da rede passam por análise de qualidade, ou seja, processo de validação para garantir confiabilidade. A base de dados é dividida em ambientais, contendo os radiométricos e meteorológicos, e anemométricos, reportando velocidade, direção do vento e temperatura do ar (ver em <http://sonda.ccst.inpe.br/>).

Um outro banco de dados observacionais é a rede internacional de radiação solar SolRad-Net, que é constituída por sensores de base terrestre para realizar medições de fluxo solar em tempo quase-real para centros de pesquisa no mundo todo e outros usuários. O instrumento utilizado para o monitoramento do fluxo de radiação solar na SolRad-Net é o piranômetro. Os dados destes instrumentos podem ser filtrados ou não e a base de dados para esta variável, irradiância solar, encontra-se disponível em 3 níveis: nível 1.0 – em tempo real sem rastreabilidade e calibração final, 1.5 – selecionados, sem anomalias nos dados e 2.0 – de qualidade garantida, com calibração e selecionados sem anomalias nos dados. Esta rede possui sensores instalados no território brasileiro, os quais registram diariamente dados de irradiância, dentre outras medições possíveis (informações disponíveis em <https://solrad-net.gsfc.nasa.gov>).

Sistemas Integrados de Dados Ambientais (SINDA) é outra rede de dados de radiação solar associada ao Satélite de Coleta de Dados (SCD) com dados processados no Centro Regional de Natal. Em órbita e operação desde 1993, o satélite retransmite a um centro de missão os sinais recebidos de um grande número de plataformas de coleta de dados, equipamentos automáticos com sensores eletrônicos espalhados pelo território nacional, e conseqüentemente distribui a diversas instituições no Brasil e no exterior. Os dados SCD-1 são fundamentais para diversas aplicações, sendo alguns dos parâmetros

ambientais medidos: nível de água em rios e represas, a qualidade da água, a precipitação pluviométrica, a pressão atmosférica, a intensidade da radiação solar, a temperatura do ar, entre outros (mais informações podem ser encontrada em internet http://www.inpe.br/scd1/site_scd/scd1/missao.htm).

2.3.2. Séries históricas de radiação solar inferidas a partir de dados de satélites

A ascensão das tecnologias de sensores orbitais e o avanço no desenvolvimento de parametrizações de transferência radiativa permitiram criar bases de dados históricas de radiação solar utilizando informações de satélites. Neste estudo serão apenas contextualizadas algumas bases de dados que apresentam cobertura sobre o Brasil e foram extensivamente validadas. A Tabela 2.2 mostra algumas informações básicas sobre algumas bases de dados descritas nesta seção. Verifica-se que todas as bases de dados utilizam princípios físicos na solução da transferência radiativa. Estudos de validação destas bases são descritas na Seção 2.4.

No âmbito nacional, existem dois produtos de radiação solar derivados a partir de satélites, ambos desenvolvidos no INPE. O primeiro é o produto de radiação solar global estimado pelo modelo GL do CPTEC-INPE, objeto central deste trabalho. Este modelo foi inicialmente desenvolvido na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e aplicado para avaliar a radiação solar global à superfície do nordeste brasileiro com o uso de imagens do canal visível do satélite Meteosat (CEBALLOS; MOURA, 1997). Posteriormente, o modelo foi adaptado no CPTEC-INPE para aplicação a imagens do canal visível do sensor IMAGER do satélite GOES sobre a América do Sul (CEBALLOS et al., 2004). O modelo GL computa os campos de radiação solar para cada imagem do satélite GOES com uma frequência temporal de 15 ou 30 minutos ou ainda em tempo maior (3 horas), dependendo do escaneamento do satélite GOES em operação. Com relação ao escaneamento, em alguns períodos o satélite GOES operou com cronograma de escaneamento de 15 minutos (exemplo: GOES-10 03/2007-11/2009 e GOES-12 12/2009-04/2010). Esses campos gerados a partir das imagens observadas a cada instante do imageamento do satélite são chamados de produto de radiação solar instantâneo. A partir dos campos instantâneos de radiação são estimados os campos de

médias diárias e mensais. Os produtos estão em grade regular de 1800 x 1800 pixels com resolução espacial de $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ (aproximadamente 4 x 4 km no nadir do satélite na região do Equador) cobrindo as latitudes entre 50°S e $21,96^\circ\text{N}$ e longitudes 100°W e $28,04^\circ\text{W}$. Além das escalas temporais instantânea, diária e mensal, a DSA/CPTEC-INPE disponibiliza dados em sua página web para o período 10 anos (janeiro de 1996 a dezembro 2006), compilados em forma de pentadas (média de 5 dias). Atualmente, o produto apresenta uma série histórica de 22 anos completos (1997-2019). Esta série mais longa está em fase de compilação para ser incluída na página web como uma versão mais recente da base histórica. A disponibilidade dos dados binários nas escalas temporais mencionadas acima coloca o produto da DSA/CPTEC-INPE em destaque diante dos demais dados de satélite de radiação disponíveis para o Brasil e América do Sul.

A Figura 2.2 apresenta os campos de radiação solar média mensal e desvio padrão, exemplificando a cobertura do produto para julho de 2017. Detalhes do modelo de radiação solar utilizado para gerar os dados de radiação da DSA, o modelo GL, é apresentado na Seção 2.5.

Outra fonte de informações sobre a distribuição espacial de radiação solar sobre o Brasil são os mapas disponibilizados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017), o qual foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), integrante do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), uma das divisões do INPE. O LABREN em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) adaptou um modelo físico de transferência radiativa do *Institut für Geophysik und Meteorologie - Universität zu Köln* (IGMK) (STUHLMANN et al., 1990) para a climatologia e condições atmosféricas observadas no Brasil (PEREIRA et al., 2006). Após a adaptação, o modelo foi denominado BRASIL-SR, que usa apenas banda VIS, é baseado no método de dois-fluxos e simula os seguintes processos radiativos: interação com nuvens, espalhamento dos gases atmosféricos (Rayleigh), absorção por gases atmosféricos (O_3 , CO_2 e vapor d'água) e atenuação pelos aerossóis (PEREIRA et al., 2017). O modelo estima as componentes da irradiação solar na superfície, incluindo global horizontal, direta

normal e difusa. A resolução espacial é de $0,09^\circ \times 0,09^\circ$ (aproximadamente 10 x 10 km) e a versão mais recente do Atlas cobre o período de 1999 a 2015. O Atlas é considerado um marco importante na área de energia solar no Brasil, principalmente voltado ao setor elétrico brasileiro.

Além das séries de dados de radiação solar descritas acima, existem outras bases com cobertura sobre a América do Sul. No geral estas bases apresentam menor resolução espacial do que o modelo GL e BRASIL-SR. Entre estas bases de dados, destacam-se os produtos de radiação com cobertura global dos projetos *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP) e *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES). Ambas as bases de dados inferem a distribuição espacial e propriedades de nuvens, as quais são utilizadas como parâmetros de entrada num código de transferência radiativa para estimativa de fluxos radiativos. O ISCCP utiliza basicamente canais espectrais de banda estreita de satélites de órbita polar da série *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e satélites de órbita geoestacionária de diversas agências internacionais (por exemplo: GOES - *United States of America* (USA), *Indian National Satellite System* (INSAT) - Índia, METEOSAT - Europa e *Geostationary Meteorological Satellite* (GMS) - Japão) para estimar seus produtos de nuvens e radiação. O ISCCP estima os fluxos no TOA, na superfície e em três níveis da atmosfera por meio de um modelo simplificado de transferência radiativa (OINAS et al., 2001; LACIS; OINAS, 1991) desenvolvido no âmbito do modelo ModelE2 (SCHMIDT et al., 2014) pelo *Goddard Institute for Space Studies* (GISS) da NASA. A versão mais recente do produto disponível está em escala mensal, resolução espacial de 110 km e o período de dados disponível é de julho de 1983 a dezembro de 2009. Os produtos de radiação e outros parâmetros de superfície e nuvens estão disponíveis em <https://isccp.giss.nasa.gov>. Detalhes sobre as estimativas de radiação disponíveis pelo ISCCP são descritas em Rossow e Zhang (1995).

Por outro lado, o sistema CERES, composto por radiômetros de banda larga que medem a radiação solar refletida e a radiação infravermelha emitida para o espaço, permite inferir os fluxos radiativos no topo da atmosfera. O CERES é um dos instrumentos de maior prioridade estabelecidos para o *Earth Observing System* (EOS) da NASA

instalado em diversos satélites de órbita polar da NOAA (WIELICKI et al., 1996). O primeiro instrumento CERES foi lançado em 1997 no satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e o último da geração em 2017 no satélite *Joint Polar Satellite System* (JPSS). Os fluxos radiativos de onda curta e onda longa na superfície são estimados a partir de um código de radiação (GUPTA et al., 2001; DARNELL et al., 1992), que considera os processos de espalhamento e absorção molecular e atenuação de nuvens. O albedo da superfície é computado internamente ao código utilizando ângulo zenital e outros parâmetros físicos. As condições atmosféricas são descritas utilizando dados de reanálise e produtos de nuvens derivados do próprio CERES, e este produto tem resolução espacial de 140 km. Para mais informações e outros detalhes sobre o produto, ver <https://ceres.larc.nasa.gov>. Os erros associados aos produtos de radiação à superfície do ISCCP e CERES estão basicamente atribuídos às incertezas dos parâmetros de entrada dos códigos de radiação e à baixa resolução do modelo (DARNELL et al, 1992).

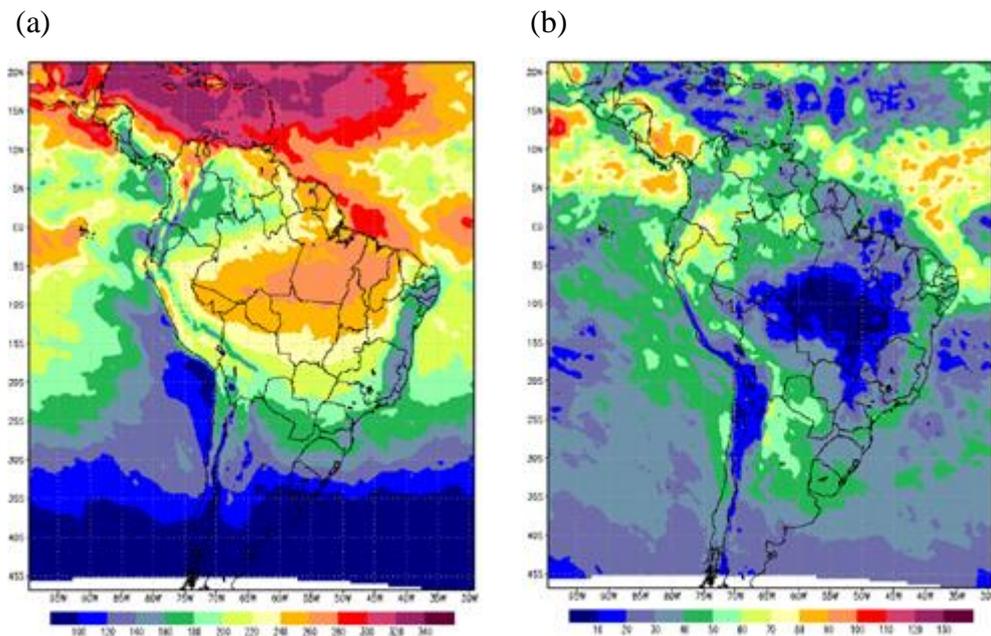
A série climatológica de radiação solar do *Satellite Application Facility on Climate Monitoring* (CM-SAF) é baseada nas imagens dos satélites geoestacionários do consórcio Europeu, satélites *Meteosat* e *Meteosat Second Generation* (MSG), e cobrem apenas parte da América do Sul (PFEIFROTH et al., 2019). Os produtos de radiação solar do CM-SAF apresentam dados de radiação solar também baseados em informações de satélites de órbita polar denominada série *Clouds, Albedo and Radiation* (CLARA), enquanto que a base de dados de satélite geoestacionário é referida como série *Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat* (SARAH). Este último cobre basicamente a Europa, África, o Oceano Atlântico e partes da América do Sul. O produto do CM-SAF utiliza algoritmo Heliosat (POSSELT et al., 2012) e informações do canal visível (0,45 - 1,00 μm) dos imageadores *Meteosat Visible and InfraRed Imager* (MVIRI) e *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) instalados respectivamente nos satélites da Primeira e Segunda Geração Meteosat. O processo de inferência chamado *Mesoscale Atmospheric Global Irradiance Code* (MAGIC) combina dados dos referidos sensores de satélite (especificamente índice de nebulosidade) e do algoritmo de transferência radiativa de céu sem nuvens. As bases físicas do algoritmo de sensoriamento remoto da radiação solar são apresentadas por

Uib (2003) e Mueller et al. (2004). A versão mais recente do algoritmo inclui como parâmetros de entrada: vapor d'água e ozônio provenientes da reanálise do ERA-Interim (DEE et al., 2011), profundidade óptica de aerossóis climatológico do produto *Monitoring Atmospheric Composition and Climate* (MACC), que combina técnicas de assimilação e dados de satélite (BENEDETTI et al., 2009; MORCRETTE et al., 2009).

Além do uso de dados de radiação mencionados anteriormente, existem outros provenientes de modelagem numérica para fins específicos e de grande utilidade para diversos outros grupos de pesquisa. Os dados de reanálise meteorológica são conjuntos de dados obtidos a partir da combinação de dados observacionais e assimilados por modelos. Como exemplo, é possível mencionar os conjuntos de reanálises ERA-Interim do *European Center for Medium Range Forecasting* (ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/>), *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* (MERRA) produzido pelo *Goddard Space Flight Center* (GSFC)/NASA (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>) e também do conjunto de dados *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (<https://www.ncep.noaa.gov/>). Um estudo de avaliação utilizando reanálises de Boilley e Wald (2015) comparou a irradiação solar diária disponível na superfície estimada pela análise retrospectiva MERRA da NASA e pela reanálise ERA-Interim do ECMWF com medições de solo realizadas em estações localizadas na Europa, África e no Oceano Atlântico. Os autores verificaram que o coeficiente de determinação (R^2) para o índice de claridade diária variou entre 0,38 e 0,53, demonstrando que uma grande parte da variabilidade na irradiação não é capturada pelas reanálises analisadas. Outro exemplo de aplicação de reanálise é o estudo realizado por Khaled e Afandi (2014), que utilizou o conjunto de dados solares da reanálise do CFSR/NCEP como uma substituição das medições de radiação solar de superfície na região do Oriente Médio e do norte da África, devido a um problema de falta de estações meteorológicas observacionais e escassez de distribuição espacial do local. Segundo os autores, em resumo, um primeiro domínio sobre o Egito mostrou que a comparação entre o CFSR e as observações teve um erro médio muito pequeno de 4,4%, erro quadrático médio de 7,9% e um alto coeficiente de correlação de 0,979. A segunda área de interesse no noroeste da África

também apresentou um pequeno MBE (*Mean Bias Error*) de 5,8%, RMSE (*Root Mean Square Error*) de 8,8% e uma alta correlação de 0,982. E o terceiro domínio sobre a península arábica obteve MBE e RMSE maiores na ordem de 8,5% e 16,4%, e uma menor correlação de 0,895.

Figura 2.2 - Campos gerados com dados do modelo GL1.2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$): (a) média mensal e (b) desvio padrão, da radiação diária para o mês de julho de 2017.



Fonte: Adaptada de Ceballos e Macedo (2014).

Tabela 2.2 - Descrição dos dados de radiação solar de diferentes produtos. São inseridos a fonte, resolução espacial, resolução temporal, período, características físicas e referência.

Produto	Satélite	Resolução espacial	Resolução temporal	Período	Características físicas (modelo - referência)	Referência (produto)
GL1.2	GOES	4 x 4 km	15 ou 30 min diária mensal	1998-Atual	modelo físico simplificado de transferência radiativa	Ceballos et al. (2004)
Brasil SR	GOES	10 x 10 km	30 min	1999-2015	método dois-fluxos adaptado para o Brasil, Stuhlmann et al. (1990) e Pereira et al. (2006)	Pereira et al. (2017)
ISCCP-FH	INSAT - Índia Meteosat - Europa GMS - Japão e série NOAA	110 km	mensal	1983-2009	modelo simplificado, Lacis and Oinas (1991) e Oinas et al. (2001)	Rossow e Zhang (1995)
SYN1deg	TERRA, AQUA, TRMM e JPSS	140 km	mensal	1997-Atual	código de radiação de Fu-Liou, Fu e Liou (1993)	Rutan et al. (2015)
CM-SAF SARAH-E	Meteosat e MSG	5 km	horária diária mensal	1983-2017	algoritmo Heliosat - Posselt et al. (2012)	Pfeifroth et al. (2019)

2.4. Estudos de avaliação de séries históricas consolidadas de radiação solar via satélite

Considerando a importância das séries históricas de variáveis meteorológicas para o monitoramento e compreensão do clima, é importante que a qualidade de seus dados compreenda o conjunto de metadados. Entendem-se informações de qualidade aquelas associada à acurácia, homogeneidade e estabilidade dos dados frente aos de referência. As bases históricas de radiação solar estimadas via satélite sofreram diversos aprimoramentos devido aos avanços na área de sensoriamento remoto e na modelagem da radiação. Essas inovações associadas à degradação de sensores tornam importante as avaliações contínuas dessas bases históricas.

Na Seção 2.3.2 apresentaram-se algumas bases de dados de radiação solar consolidadas, e aqui são apresentados alguns dos estudos de validação e testes de tendências e homogeneidade destas séries.

Rossow e Zhang (1995) avaliaram os dados de irradiância solar das primeiras versões do produto *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP-FC) (resolução espacial de 280 km e espacial de 3 horas) utilizando dados observacionais de poucas estações, menos de 20: Wisconsin - USA no experimento *First ISCCP Regional Experiment* (FIRE1986, 12 estações), Oceano Tropical - *Tropical Ocean - Global Atmosphere / Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment* (TOGA-COARE1991), Borrow - Alaska (1 estação) e Polo Sul (1 estação). Os autores mencionam que parte dos erros do produto deve-se a diferença entre intervalo espectral das medidas (0,2 – 2,0 μm) e das estimativas de satélites (0,2 – 5,0 μm), e também pela simplificação utilizada no cálculo do efeito dos aerossóis no algoritmo de inferência. Na versão FC utilizou a profundidade óptica de aerossol de *background* de 0,16 constante no tempo e espaço. No ano de 2004, foi lançada uma nova versão dos produtos de radiação, ISCCP-FD com resolução espacial de 280 km e temporal de 3 horas, em que as propriedades da superfície (albedo e temperatura) e atmosfera (vapor d'água, aerossol e nuvens) foram aprimoradas no algoritmo (ZHANG et al., 2004). Com relação à versão anterior, utilizando maior número de estações radiométricas em distintas localidades, o produto

ISCCP-FD teve o erro médio mensal reduzido para $8,8 \text{ W.m}^{-2}$ (versus $15,0 \text{ W.m}^{-2}$, ISCCP-FC), enquanto que o desvio padrão do erro médio manteve-se praticamente igual à versão anterior ($21,5$ versus $23,7 \text{ W.m}^{-2}$ para ISCCP-FC). De acordo com Zhang et al. (2004), os maiores erros da série ISCCP-FD (erro médio de $20,0 \text{ W.m}^{-2}$) estavam nas regiões tropicais durante o período de queima de biomassa. No entanto, os autores indicavam que as plumas de fumaça eram detectadas como nuvens no processo de inferência, e, portanto, parte do sinal de aerossóis era contabilizado, diminuindo a radiação à superfície. Ainda assim, o modelo apresenta deficiências em representar os aerossóis. A versão mais recente denominada ISCCP-FH apresenta resolução temporal de 3 horas e maior resolução espacial de 110 km. Atualmente, não há documento no formato de artigo descrevendo aspectos físicos e de acurácia do produto nesta versão. As informações aqui apresentadas são baseadas em material disponível na página web do projeto, ver <https://isccp.giss.nasa.gov/>. Fisicamente as principais mudanças com relação à versão anterior estão associadas a melhor descrição da distribuição vertical das nuvens, a inclusão de algumas absorções fracas do vapor d'água, CO_2 e O_2 , atualização da climatologia de aerossóis e das bases de dados de absorção dos gases atmosféricos (CH_4 e N_2O). O grupo de pesquisa realizou uma avaliação preliminar utilizando dados de superfície do BSRN para o ano de 2017, e ainda comparou com os dados do ISCCP-FD e CERES. Para a radiação solar descendente à superfície, o erro médio mensal (desvio padrão do erro) é de $-1,4$ ($20,9$), $-3,8$ ($23,8$) e $4,4$ ($16,2$) W.m^{-2} respectivamente para os produtos ISCCP-FH, ISCCP-FD e CERES. Conclusões iniciais da validação indicam que o produto FH apresenta menor erro do que a versão FC, porém mantém praticamente o mesmo desvio padrão.

Para 313 estações de superfície sobre a Europa, Urraca et al. (2017) mostram que dados do produto da SARA-2, a última versão do produto, apresenta melhores estimativas na região da Europa Central com um desvio médio absoluto entre $8,0$ e $13,0 \text{ W.m}^{-2}$. Por outro lado, os produtos apresentam menor acurácia nas regiões de latitudes altas, superfícies cobertas de neve, altas cadeias montanhosas e áreas costeiras.

Sanchez-Lorenzo et al. (2013) validaram dados mensais do produto radiação solar à superfície derivada do CM-SAF sobre a Europa, comparando com um conjunto de

dados de superfície homogeneizada do *Global Energy Balance Archive* (GEBA) cobrindo um período de 1983 a 2005. O produto de radiação solar avaliado é baseado em dados do canal VIS dos satélites Meteosat de primeira geração, proporcionando um conjunto de dados com elevada resolução espacial ($0,03^\circ \times 0,03^\circ$). Os resultados demonstraram haver uma excelente concordância entre os dois conjuntos de dados. Por outro lado, encontraram uma deficiência do modelo em um período da série, especificamente por volta de 1988, possivelmente devido a mudanças nos instrumentos de satélite, embora outros fatores também sejam possíveis, por exemplo, impacto de aerossóis de enxofre lançados pela erupção vulcânica de Pinatubo em 1991. Além disso, os resultados mostraram haver uma discreta superestimação do erro de $5,2 \text{ W.m}^{-2}$ dos dados CM-SAF em comparação com as estações GEBA, e com erro médio absoluto de cerca de $8,0 \text{ W.m}^{-2}$, inferior ao limiar de precisão de $15,0 \text{ W.m}^{-2}$ recomendado pelo CM-SAF. Segundo Sanchez-Lorenzo et al. (2013) esse valor proposto de precisão de $15,0 \text{ W.m}^{-2}$ é a combinação da precisão do instrumento a bordo do satélite de $10,0 \text{ W.m}^{-2}$ para as recuperações do CM-SAF mais $5,0 \text{ W.m}^{-2}$ das incertezas das medições de superfície. Enfim, o trabalho mostrou que o conjunto de 23 anos de dados da CM-SAF é homogêneo depois de 1994, podendo assim, a série ser usada para análise de tendências após este ano.

Outra aplicação de uma série longa de dados resultou no trabalho do projeto HelioClim (HC), que explorou dados de irradiância solar de superfície do satélite Meteosat. De acordo com Blanc et al. (2011), a base de dados explorada contemplou um período de 27 anos e o estudo deparou-se com desafios de mudanças de sensores, na calibração e na amostragem no espaço e no tempo. Os dados do projeto foram construídos contemplando dados diários e mensais de 2 bancos de dados: o HC-1 de 1985 a 2005, e um conjunto HC-3 de 2004 a 2011, este com recurso mais avançado com relação a resolução espacial e temporal. As séries temporais HC-1 e HC-3 foram analisadas de forma individual e posteriormente avaliada uma série conjunta a partir dos bancos de dados alcançados. Baseado na consistência das informações e após validação dos dados, demonstrou-se que o banco de dados HC-3 fornece resultados precisos para África, Europa e Oceano Atlântico, e o HC-1 oferece valores de boa qualidade apenas para a África, bacia Mediterrânea, Oceano Atlântico Central e, normalmente, para latitudes

entre -45° e 45° . No entanto, os autores alertaram sobre o cuidado com relação à análise de séries temporais, principalmente na diferença de processamento e com resoluções espacial e temporal.

Mueller et al. (2009) descreveram que a validação operacional dos dados do CM-SAF-SARAH para seis estações radiométricas de superfície sobre a Europa mostra que a diferença absoluta média entre as medições mensais do solo e a irradiância da superfície solar baseada em satélite é de $5,0 \text{ W.m}^{-2}$ com um desvio médio de $-1,0 \text{ W.m}^{-2}$ e um RMSE de $5,4 \text{ W.m}^{-2}$. Na região africana, os erros médios e erros quadráticos médios dos dados de radiação solar instantânea são respectivamente $-31,0$ a $22,0 \text{ W.m}^{-2}$ e $11,0$ a $27,0 \text{ W.m}^{-2}$, dependendo da localidade da estação. De acordo com os autores, apesar da boa acurácia do produto, os processos físicos podem ainda ser melhor representados no algoritmo de radiação, principalmente a heterogeneidade de nuvens, albedo da superfície e melhor descrição de aerossóis.

Com relação ao Atlas Brasileiro de Energia Solar, Pereira et al. (2017) realizaram uma correção de erro dos dados de radiação solar utilizando dados de estações radiométricas no período entre 1999 e 2015. Após essa correção, os autores encontraram erro médio na radiação solar mensal inferior a 1,0% (radiação média mensal variando aproximadamente de $185,0 \text{ W.m}^{-2}$ na região sul a $229,0 \text{ W.m}^{-2}$ no nordeste), enquanto que RMSE foi aproximadamente de 8,0% e coeficiente de correlação entre 0,81 e 0,98. Essa boa acurácia com relação aos dados observacionais é esperada, principalmente em termos do erro médio mensal, devido a correção. Porém, verifica-se que o RMSE é bastante similar aos valores encontrados na literatura e citados acima ($8,0$ a $13,0 \text{ W.m}^{-2}$ em Urraca et al. 2017). Geralmente a correção de erro é aplicada na localidade em questão, sendo então limitada para todo o domínio do território determinado. Não há informações sobre o erro médio dos dados sem a correção, o que poderia dar um indicativo das incertezas associadas a inferência de radiação.

Porfirio (2017) objetivou realizar uma contribuição na modelagem do modelo GL a partir da análise do desempenho de estimativas e com o aprimoramento nas hipóteses físicas incluindo novas parametrizações. Neste trabalho, as estimativas do modelo GL

na versão 1.2 aplicado às imagens GOES sobre o Brasil apresentou bons resultados em base mensal com erros médios entre - 10,0 e 10,0 W.m^{-2} e um desvio padrão médio de 16,0 W.m^{-2} nas regiões nordeste, sudeste e sul no período 2011-2012. As regiões norte e centro-oeste apresentaram maiores discrepâncias, desvios médios mensais de 36,0 e 18,0 W.m^{-2} respectivamente, principalmente na época de maior concentração de aerossóis atmosféricos de queimadas, no trimestre agosto-setembro-outubro de 2013-2014. Os resultados comprovaram importância da inclusão do constituinte atmosférico a partir da modelagem dos aerossóis na estrutura do modelo. Porfirio (2017) incluiu parametrização para o efeito dos aerossóis na estrutura do modelo definindo uma versão GL 2.0. Em resumo, as estimativas de irradiação global com o GL 2.0 apresentam melhores resultados em relação às do GL1.2, diminuindo os desvios médios em cerca de 50% para dias de céu claro dentro da estação de queimadas, ou seja, um aperfeiçoamento na estimativa dos ciclos diários e da irradiação solar. Como mencionado anteriormente este estudo limitou-se ao GL 1.2, porque os dados do GL 2.0 foram apenas para um período curto.

Britto et al. (2016) apresentaram um diagnóstico do modelo de radiação solar GL1.2 para o período de janeiro a junho de 2016, validando os dados de irradiação solar global, expressada como irradiância média diária, com os dados da rede de superfície do INMET. Foram utilizadas 473 estações meteorológicas automáticas e a comparação indicou que o modelo fornece estimativas de radiação solar de boa qualidade, com desvio médio mensal sobre a rede do INMET entre -7,0 e 27,0 W.m^{-2} e desvio padrão entre 16,0 e 32,0 W.m^{-2} . Uma conclusão do trabalho é a possibilidade de utilização do modelo GL como uma estratégia para detectar registros duvidosos na rede de solo.

Porfirio e Ceballos (2014), realizaram um importante estudo de comparação de estimativas das componentes da radiação solar (global, direta e difusa) geradas por imagens de satélite comparando o modelo GL com dados observacionais. Este trabalho visou comparar estimativas de radiação solar geradas por imagens de satélite com medidas à superfície da rede SONDA no município de Petrolina - PE no período entre julho e dezembro de 2008. Os resultados obtidos pelo modelo físico proposto mostraram acurácia satisfatória tendo como resultados na escala mensal MBE de

6,1 W.m⁻² para irradiação global, -3,0 W.m⁻² para direta e -2,0 W.m⁻² para difusa. Segundo os autores, a aplicação de ajustes nas parametrizações de água precipitável, aerossóis e nebulosidade pode melhorar o desempenho futuro da metodologia.

Os estudos de validação do modelo GL foram realizados para alguns anos, e no atual trabalho pretende-se estender a análise para a série de dados de radiação do GL (entre 1998 e 2017) que utilize dados de satélite da geração anterior as do GOES-R. Os trabalhos descritos acima com relação a avaliação do modelo GL serão utilizados como referência para comparar as estatísticas de desempenho da série toda do GL1.2.

Com relação a estudos de tendência dos dados de radiação solar, Bezerra e Da Silva (2013) relataram a forte correlação das variações meteorológicas, de radiação solar incidente à superfície terrestre, e o fenômeno do *global dimming* nas últimas décadas. Existem estudos em escala mundial, mas no nordeste do Brasil, nas localidades de Petrolina - PE e Juazeiro - BA, Silva et al. (2010) verificaram que houve redução acentuada no saldo de radiação na ordem de 36,9 W.m⁻² (entre 1975 e 2006), decorrente de alterações nas características da superfície e quantidade significativa de aerossóis provenientes de queimadas. Entretanto, no período entre 1948 a 1987 houve comportamento inverso, com tendências positivas estatisticamente significativas em outros períodos e localidades no território brasileiro.

Em estudo recente, Sena et al. (2018) usando dados do ISCCP verificaram que no período entre 1983 e 2009 existe declínio de nebulosidade na região da Amazônia. Então, como aponta o estudo, a alta redução da cobertura de nuvens na bacia amazônica poderia afetar diretamente o aumento da irradiância na superfície nesta região. O presente estudo, corrobora com esta hipótese de Sena et al. (2018) com relação ao aumento dos fluxos radiativos a superfície (Seção 4.5).

2.5. Modelo GL1.2

Esta seção visa apresentar o modelo GL1.2, que é baseado em processos físicos e permite estimar a irradiância solar ao nível do solo a partir da refletância observada por

satélite (CEBALLOS et al., 2004; PORFIRIO, 2017). Mesmo havendo aplicação do GL às imagens MSG, com o canal visível exibindo uma largura espectral um pouco mais ampla, o GOES (nadir na longitude 75°W) abrange o Brasil todo com largura espectral mais estreita e uma maior definição espacial. Por isso, as informações do satélite GOES aplicado ao modelo correspondem ao interesse deste trabalho, que contempla três propriedades essenciais na avaliação da propagação da radiação solar: atenuação da radiação incidente no TOA no ultravioleta (UV) e VIS por bandas de ozônio (O₃), dispersão pelo ar / nuvens e absorção de radiação associada ao dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O) na fase líquida e vapor.

O modelo divide o espectro solar em três bandas espectrais para a transferência radiativa: UV (0,1 - 0,4 μm), VIS (0,4 - 0,7 μm) e infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near Infrared Radiation*) (0,7 - 2,8 μm). O modelo é baseado em um número mínimo de parâmetros físicos (água precipitável, conteúdo de ozônio e dióxido de carbono), não inclui a presença de aerossol, e a refletância de superfície é constante igual a 0,09.

A informação proveniente do satélite é a radiância espectral L, onde o fator de refletância no canal 1 é uma estimativa da refletância para saída da radiação VIS dentro de um pixel. O fator de refletância F e a irradiância emergente E_{VISGOES} no intervalo GOES podem ser avaliados pelas expressões:

$$F = \frac{\pi L}{S_{GOES}} \text{ e } E_{VISp} = \frac{1}{f} \frac{F}{\mu_0} \quad (2.1)$$

Onde a quantidade f é uma função de refletância que corrige os efeitos da reflexão anisotrópica e é assumida f = 1 em todos os casos. S_{GOES} é uma densidade de fluxo solar espectral média no TOA no intervalo do sensor VIS e $\mu_0 = \cos Z_0$ é o cosseno do ângulo zenital Z₀.

Em resumo, o conjunto de hipóteses definido pela estrutura do modelo para irradiância total G ao nível do solo tem a seguinte formulação:

$$G = G_{UV2} + G_{VIS} + G_{NIR} \quad (2.2)$$

Assim, serão reproduzidas algumas formulações adotadas para a estimativa da irradiância solar na superfície G como a soma de cada intervalo espectral, sendo no UV2, VIS e NIR respectivamente, que serão explicadas nas Seções 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3.

2.5.1. Radiação no espectro visível

A faixa espectral VIS compreende 38,8% da constante solar e a absorção neste intervalo ocorre sobretudo na estratosfera com intensidade fraca, principalmente na banda de Chappuis (0,42 - 0,74 μm) devido ao O_3 . Na troposfera considera-se que os processos dominantes são conservativos, limitando-se à dispersão Rayleigh e de nuvens. Sendo assim, a estrutura do balanço de radiação do sistema Terra-atmosfera no espectro VIS pode ser apresentada simplificada como:

$$\mu_0 S_{VIS} = E_{VIS_p} + A_{VIS_a} + (1 - R_{VIS_g}) G_{VIS} \quad (2.3)$$

Nesta expressão, o R_{VIS_g} representa a refletância VIS do solo, a irradiância extraterrestre é particionada em uma irradiância refletida E_{VIS_p} no TOA, uma fração absorvida A_{VIS_a} dentro da atmosfera e irradiância absorvida pelo solo G_{VIS} .

Aplicando parametrizações e considerando $T(\mu_0)$ a transmitância deduzida a partir da expressão de absortância proposta por Lacis e Hansen (1974), adaptada ao intervalo VIS do GL, a irradiância solar VIS à superfície é dada por:

$$G_{VIS} = \frac{\mu_0 S_{VIS} T(\mu_0) (1 - R_{VIS}(trop))}{(1 - R_{VIS_g})} \quad (2.4)$$

2.5.2. Radiação no espectro ultravioleta

O intervalo UV consiste de 8,0% da constante solar contemplando uma banda UV1 desprezível, banda Hartley (0,22 - 0,30 μm), e outra UV2 inclusa, banda Huggins (0,30 - 0,40 μm). Uma análise utilizando o *Santa Bárbara DISORT Atmospheric Radiative*

Transfer (SBDART) comprovou que a irradiância no solo no espectro UV1 é insignificante, devido exercer forte absorção pelo O₃ neste intervalo.

A absorção do fluxo direto na estratosfera ocorre pelo O₃, no intervalo ultravioleta, aplicando a subtração da energia do fluxo direto incidente no topo da troposfera e do fluxo direcional refletido pelo sistema que emerge na direção do satélite.

Como o fluxo direto é absorvido parcialmente no intervalo de UV2, então o balanço de radiação é avaliado similarmente à equação 2.3 de acordo com a equação:

$$\mu_0 S_{UV2} = E_{UV2_p} + A_{UV2_a} + (1 - R_{UV2_g}) G_{UV2} \quad (2.5)$$

Conseqüentemente, a irradiância solar na superfície no UV2 é determinada pela seguinte expressão:

$$G_{UV2} = \frac{\mu_0 S_{UV2} (\mu_0) T_{UV2} (\mu_0) (1 - R_{VIS} (trop))}{(1 - R_{VIS_g})} \quad (2.6)$$

Com T_{UV2} sendo a transmitância no intervalo UV2, termo avaliado baseado na parametrização de Lacis e Hansen (1974).

2.5.3. Radiação no espectro infravermelho solar

No intervalo NIR a radiação se estende por mais de 50,8% do espectro solar, sendo atenuada fortemente por nuvens pela absorção devido à água em fase de vapor e por dióxido de carbono (CO₂). Neste intervalo, o modelo considera que o efeito Rayleigh da atmosfera é desprezível. Na superfície incide fluxo direto que atravessa a atmosfera entre as nuvens ou fluxo difuso devido ao efeito de múltiplas reflexões entre a superfície e a camada de nuvens. É atribuído que as nuvens absorvem e refletem fortemente, de forma que a transmitância é negligenciável.

Assim, dado que a profundidade óptica do espalhamento Rayleigh diminui rapidamente com o comprimento de onda, o modelo GL supõe que existe apenas um feixe direto em

condições de céu claro, por outro lado, se as nuvens possuem uma área de nebulosidade, a expressão para a irradiância no NIR é dada por:

$$G_{NIR} = \frac{(1-C) \mu_0 (S_{NIR} - \Delta S) + C \delta G}{(1-R_{NIRg} C R_{NIRc})} \quad (2.7)$$

Onde, C é a cobertura fracional por nuvens, δG é a transmitância de uma nuvem típica, considerado como nulo em primeira aproximação pelo modelo, e os termos R_{NIRg} e R_{NIRc} são respectivamente as refletâncias NIR da superfície e das nuvens.

O parâmetro C é avaliado a partir de uma refletância instantânea R observada pelo satélite, assim é assumido para o território brasileiro uma refletância mínima $R_{min} = 0,09$ observada na ausência de nuvens, isto é, condições de céu limpo, e define-se o valor $R_{max} = 0,465$ associado à transição entre campo de nuvens cumuliformes e estratiformes.

$$C = \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad (2.8)$$

A principal fonte de erros talvez seja a avaliação da cobertura de nuvens. Mas nota-se de fato que o valor R_{max} pode ser associado à sazonalidade e à dinâmica local de geração de nuvens, assim como da característica da região considerada, dependendo assim implicitamente em um segundo limiar na temperatura de brilho. Enquanto isso, o parâmetro R_{min} está associado ao albedo (variável) local.

A irradiância média diária pode ser obtida por integração de valores de G com imagens geradas durante o período diário, consequentemente dividida por 86400 s (ou seja, 24 horas). O modelo GL1.2 possui uma estimativa da irradiação média diária que pode atingir um erro médio entre -10 e 10 $W.m^{-2}$ e um desvio padrão até 25 $W.m^{-2}$.

Descrição completa e detalhada do modelo apresentado pode ser encontrada em Ceballos et al. (2004) e Porfirio (2017).

3. DADOS E METODOLOGIA

O presente capítulo descreve o conjunto de dados e a metodologia utilizada nesta pesquisa. O estudo pode ser basicamente dividido em quatro etapas distintas. Resumidamente, a primeira etapa (Seção 3.1) consistiu em realizar um levantamento da quantidade de dados de radiação solar do modelo GL1.2 e das estações de superfície de referência (SolRad-Net e SONDA). Na segunda etapa do trabalho, foi realizada uma comparação entre os resultados dos dados de radiação solar de satélite e observações (Seção 3.2). A penúltima etapa foi efetuada uma avaliação da homogeneidade dos dados, principalmente nas datas de transição dos satélites (Seção 3.3). A quarta e última etapa da pesquisa foi composta pela análise temporal da série histórica de radiação solar nas estações estabelecidas, ou seja, avaliação composta pelos dados adquiridos e avaliados nas fases anteriores. A seguir, são apresentados os detalhes das quatro etapas estabelecidas para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1. Dados de radiação

Inicialmente, foram realizados o levantamento e a avaliação do conjunto de dados de superfície e dos dados de satélite disponíveis no acervo da DSA. Isto teve o objetivo de proporcionar uma ambientação com as informações de radiação solar e conseqüentemente possibilitar um breve entendimento das parametrizações usadas nas expressões do modelo de transferência radiativa utilizada no modelo GL1.2.

Foi importante realizar uma minuciosa coleta de dados de satélite e observacionais no período temporal a ser estudado. Para avaliar a série posteriormente foram necessários todos os detalhes dos conjuntos de dados, inclusive para ter conhecimento dos meses ou períodos que existe ausência de informações. Este levantamento contemplou todo o período estudado, que compreende a série histórica de 20 anos de dados de radiação solar.

Ao final do levantamento dos dados, foi obtido o período completo (1998-2017) de dados diários e mensais de satélite e dos dados de superfície. Os relatórios gerais de dados em escala temporal diária para o modelo GL1.2 e mensal das observações

encontram-se apresentados nos Apêndices Tabela A.1 e Tabela A.2, respectivamente. Adicionalmente, foi obtido conhecimento dos intervalos de dados faltantes no período em avaliação.

3.1.1. Levantamento de dados disponíveis na base histórica de satélite (modelo GL1.2/CPTEC)

A base de dados de arquivos binários de médias diárias em alta resolução espacial para o período de 1998-2017 foi gerada a partir de imagens dos satélites GOES-8, 10, 12 e 13 utilizando a cronologia operacional disposta na Tabela 3.1. Estatisticamente, é possível verificar que os dados de radiação disponíveis por satélite são provenientes do GOES-8 (26,2% - 63 meses), GOES-10 (13,8% - 33 meses), GOES-12 (37,5% - 90 meses) e GOES-13 (22,5% - 54 meses), sendo os dois últimos aproximados, pois conforme pode ser verificado na Tabela 3.1, durante os meses de abril e maio de 2010 houve produto gerado para ambos satélites (GOES-12 e GOES-13).

Para os arquivos disponíveis utilizados neste trabalho, a versão 1.2 do modelo de radiação global do CPTEC possui uma série com 7024 arquivos binários de médias diárias processadas a partir de informações dos satélites GOES (1 arquivo é igual a 1800 x 1800 pixels - dados). Dentre os 7305 possíveis arquivos diários em 20 anos, a série conta com 96,15% de arquivos registrados. O número de 7024 utilizado neste estudo (ao invés de 7305 número de dias para os 20 anos) possui a média diária calculada, que não é considerada válida quando um pixel constata um intervalo de mais de 3 horas sem dado ou é anulada quando pixels apresentam erro de detecção ou estão situados em área noturna. A Tabela 3.2 ilustra os detalhes da série de arquivos diários disponíveis no período. Com relação a radiação média mensal utilizada neste estudo, esta é calculada a partir da média de dados diários disponíveis, exceto o mês de fevereiro de 2012. Para este mês, o banco de dados não possuía arquivos diários para realizar o cálculo da média mensal, portanto foi utilizado o dado mensal processado e disponível no banco de dados da DSA. A Figura 3.1 mostra a quantificação de arquivos diários dos dados mensais em percentagem por meio de faixas de representação, e é notável que mais de 93% dos meses possuem acima de 20 arquivos diários.

Importante mencionar dois aspectos associados ao banco de dados da DSA e que são usados aqui. Primeiro, os dados foram gerados no sistema operacional, ou seja, não foi realizado nenhum reprocessamento. Neste caso, possíveis problemas de operação, como imagens de satélite faltantes ou aplicação errônea da constante de calibração do canal visível podem afetar a refletividade do canal e conseqüentemente a estimativa da radiação. Segundo, neste estudo não foram visualmente inspecionados os campos de radiação para verificar possíveis falhas ou problemas. Com relação a esse último aspecto, foi realizado um controle de qualidade para eliminar prováveis dados duvidosos, mais detalhes a respeito são descritos na Seção 3.1.5.

Considerando a série histórica de 7024 arquivos disponíveis, os valores diários de GL foram extraídos para os pontos de latitude e longitude das estações de superfície, e após empregados alguns filtros (Seção 3.1.5). Neste caso, o número de dados disponíveis para cada estação (Seção 4.1) pode mudar de acordo com os filtros.

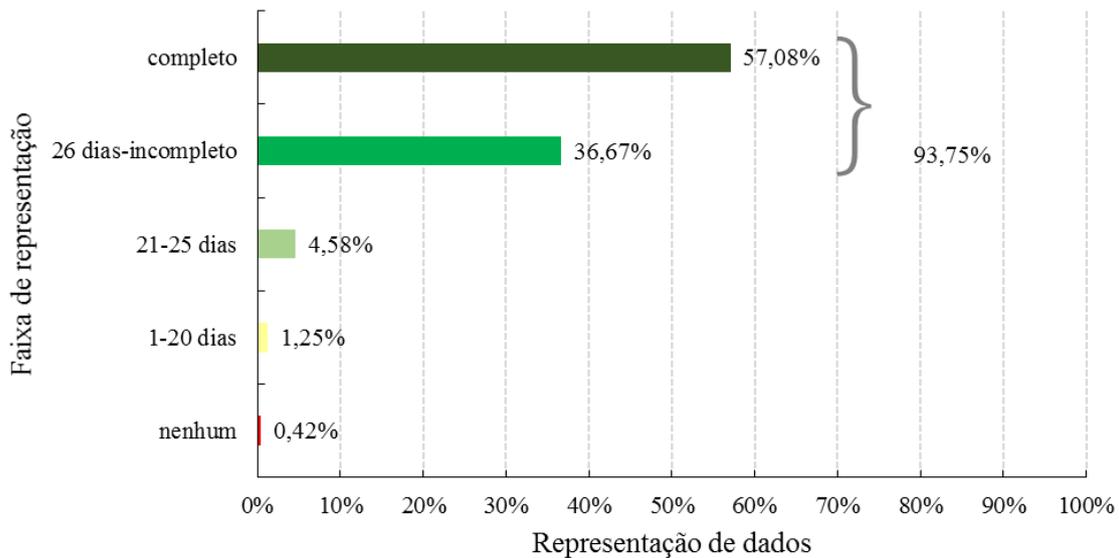
Tabela 3.1 - Satélites da série GOES e respectivos início e fim dos períodos operacionais abrangendo os 20 anos de estudo (1998-2017) da série histórica.

Satélite	Início	Fim
GOES-8	10/1997	03/2003
GOES-12	04/2003	02/2007
GOES-10	03/2007	11/2009
GOES-12	12/2009	14/04/2010 19:30
GOES-13	14/04/2010 19:34	18/05/2010 11:15
GOES-12	18/05/2010 11:30	07/2013
GOES-13	08/2013	01/2018

Tabela 3.2 - Levantamento estatístico da quantidade de arquivos diários disponíveis para cada mês no período dos 20 anos de estudo da série histórica. O mês de fevereiro de 2012 não havia arquivos diários no banco de dados disponível.

Anos	Meses												Total
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1998	29	28	29	29	30	27	30	22	30	30	30	31	345
1999	31	28	31	24	30	30	27	30	26	31	27	23	338
2000	28	28	31	30	31	30	31	29	30	25	29	31	353
2001	31	28	31	30	18	30	30	31	28	31	30	31	349
2002	31	28	30	30	21	30	31	30	29	31	29	30	350
2003	29	28	31	30	31	27	30	30	27	29	29	25	346
2004	15	28	31	30	31	28	31	31	29	31	30	31	346
2005	19	28	31	28	31	30	25	25	29	30	22	30	328
2006	28	28	31	28	31	29	30	29	24	30	30	30	348
2007	31	26	31	30	30	30	31	27	30	31	30	31	358
2008	30	27	30	28	31	29	30	30	29	29	30	30	353
2009	30	28	31	30	31	29	30	28	30	30	28	30	355
2010	29	28	31	29	30	29	30	30	30	31	29	31	357
2011	30	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	29	362
2012	30	0	31	30	31	30	31	31	30	31	30	29	334
2013	29	28	25	29	30	28	31	31	30	31	30	31	353
2014	31	28	31	30	31	30	31	29	30	31	30	29	361
2015	31	28	30	30	31	30	31	31	30	31	30	31	364
2016	31	28	31	30	31	29	31	31	30	30	30	31	363
2017	31	28	31	29	31	30	29	31	30	31	29	31	361
Total													7024

Figura 3.1 - Quantitativo de arquivos diários do modelo nos meses do período entre 1998 e 2017: 1 mês (nenhum dado), 3 meses (entre 1 e 20 dias de dados), 11 meses (entre 21 e 25 dias de dados), 88 meses (superior 26 dias, porém mês incompleto de dados) e 137 meses (completo).



Fonte: Produção do autor.

3.1.2. Levantamento de dados observacionais de superfície disponíveis

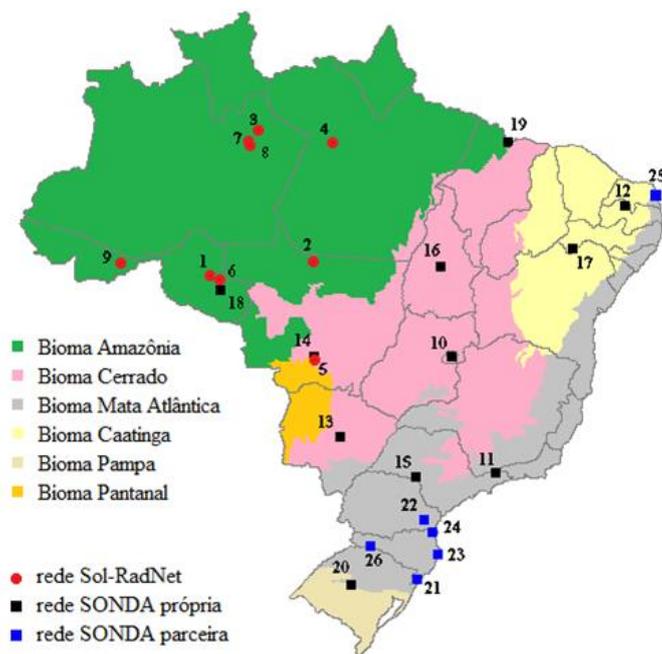
Neste estudo foram utilizados dados de radiação solar medidos à superfície, provenientes de duas redes observacionais: SolRad-Net e SONDA (incluindo todas as estações da rede inclusive estações parceiras, denominadas SONDA p). Nas Seções 3.1.3 e 3.1.4 serão discutidas respectivamente as informações detalhadas dos dados.

Todas as estações, tanto da SolRad-Net quanto do SONDA, foram empregadas devido ao fato de haver ampla amostragem para comparação, inclusive para proporcionar uma avaliação de locais com fatores ambientais variados, tais como: vegetação, clima e relevo. Importante avaliar um modelo físico, como o GL, usando variados regimes climáticos, por exemplo, as regiões do território brasileiro que possuem ecossistemas com características diferenciadas. Adicionalmente, justifica o uso destas redes por

serem consideradas de referência internacional e por apresentarem manutenção constante. A Tabela 3.3 mostra o detalhamento das informações geográficas, o período de observação das estações e a disponibilidade de dados para o presente estudo, enquanto que a Figura 3.2 mostra a distribuição espacial das estações e os biomas em que estão localizadas. Os dados destas estações também passaram por testes, a fim de avaliar a qualidade dos mesmos (Seções 3.1.3 e 3.1.4).

Mesmo não havendo meses com arquivos disponíveis e para serem usados na validação, a estação Rolim de Moura foi mantida para nortear a ausência de dados observacionais e devido ao fato de ser importante frente aos cálculos estatísticos oriundos do modelo GL.

Figura 3.2 - Mapa de Biomas do Brasil e a localização das estações da rede SolRad-Net e SONDA.



Fonte: Adaptada de IBGE (2019).

Tabela 3.3 - Informações sobre as características gerais das estações: localização (ver disposição na Figura 3.2), rede e período de dados; e levantamento estatísticos de meses com dados: quantidade de meses com arquivos disponíveis na rede (possível de ser utilizado) e quantidade de meses utilizados na comparação com dados de estimativa de satélite (validação - Seção 3.2). O Apêndice Tabela A.3 apresenta dados mais detalhados dos períodos de funcionamento de cada estação.

	Estação	Posição	Rede	Período de dados	Quantidade de meses	
					com arquivos disponíveis	usados na validação
Norte	Abracos Hill	1	SolRad-Net	1999-2005	70	35
	Balbina	3	SolRad-Net	1999-2004	47	36
	Belterra	4	SolRad-Net	1999-2005	61	38
	Ji Paraná	6	SolRad-Net	2005-2017	113	91
	Manaus	7	SolRad-Net	2008-2009	12	6
	Manaus-Embrapa	8	SolRad-Net	2015-2017	18	12
	Palmas	16	SONDA	2005-2016	136	101
	Rio Branco	9	SolRad-Net	2000-2017	181	136
	Rolim de Moura	18	SONDA	2007	0	0
Centro-Oeste	Alta Floresta	2	SolRad-Net	1999-2017	153	107
	Brasília	10	SONDA	2004-2015	132	123
	Campo Grande	13	SONDA	2004-2016	121	101
	Cuiabá	14	SONDA	2006-2012	77	67
	Cuiabá-Miranda	5	SolRad-Net	2001-2017	177	146
Nordeste	Caicó	12	SONDA	2002-2016	70	65
	Natal	25	SONDA p	2007-2017	93	64
	Petrolina	17	SONDA	2004-2017	143	123
	São Luiz	19	SONDA	2007-2017	96	84
Sudeste	Cachoeira Paulista	11	SONDA	2014-2017	46	39
	Ourinhos	15	SONDA	2006-2016	67	46
Sul	Chapecó	21	SONDA p	2009	12	11
	Curitiba	22	SONDA p	2014-2015	15	13
	Florianópolis	23	SONDA p	2004-2016	73	59
	Joinville	24	SONDA p	2009-2015	80	74
	São Martinho da Serra	20	SONDA	2005-2017	152	133
	Sombrio	26	SONDA p	2004-2016	117	89

3.1.3. Rede SolRad-Net

A rede SolRad-Net (ver <https://solrad-net.gsfc.nasa.gov/>) é composta por dados de radiação solar disponíveis com valores de 1 em 1 minuto ou a cada 2 minutos na unidade $W.m^{-2}$, ou seja, baseado nesta quantidade de minutos foram realizados os cálculos da integral diária pela regra do trapézio. A partir disso foram gerados os valores de irradiância diária ($W.m^{-2}$) em cada estação da rede por meio da conversão de unidade e posteriormente o cálculo médio dos valores mensais. A base de dados da rede SolRad-Net possuem distintos níveis de qualidade:

Nível SolRad-Net 1.0 - dados observados em tempo real, que não são rastreados e não têm a calibração final aplicada. Esse nível de dados pode conter informações imprecisas e observações que foram comprometidas por diversos motivos, por exemplo, falha do amplificador. Os dados de nível 1.0 representam as medidas brutas.

Nível SolRad-Net 1.5 - denominado dados selecionados, que são separados de erros de informações. Os dados foram liberados e são designados como livres de quaisquer problemas operacionais, assim, os de nível 1.5 representam as medidas processadas.

Nível SolRad-Net 2.0 - denominados dados de qualidade assegurada, os quais são pré e pós calibrados em campo e selecionados por erros de informações. Os dados de nível 2.0 representam as medidas processadas e de maior nível de controle de qualidade da rede, pois nestas medidas são realizadas calibrações finais, que corresponde a aplicação de correções devidas a problemas de calibração e degradação de instrumentos.

A versão escolhida dos dados da rede SolRad-Net para realização da pesquisa foi a de nível 1.5. A razão da escolha deve-se ao fato deste nível haver uma maior disponibilidade de dados, apresenta períodos mais extensos, em contrapartida, a versão 2.0 fornece quantidade de informações limitada, ou seja, desfavorável para avaliação completa da série histórica desejada nesse trabalho. Além disso, o nível SolRad-Net 1.5, como verifica-se acima, é livre de problemas operacionais e contempla eliminação dos erros de informações, sendo o nível intermediário disponibilizado pela rede internacional.

3.1.4. Rede SONDA

A rede SONDA (site <http://sonda.ccst.inpe.br/>) conta com estações de medições próprias e de estações parceiras distribuídas em várias localizações do território brasileiro (ver Figura 3.2). Os dados de radiação global ($W.m^{-2}$) utilizados possuem periodicidade a cada 1 minuto na unidade $W.m^{-2}$, e neste trabalho foram calculados os valores de irradiância diária e conseqüentemente as mensais. A irradiância média diária foi calculada por integração pelo método do trapézio. A rede adicionalmente disponibiliza, juntamente com os dados brutos radiométricos, informações auxiliares sobre testes de controle de qualidade. Ou seja, os dados disponíveis no projeto SONDA passam por processo de validação realizado pela própria rede, para garantir sua confiabilidade. Esse processo será apresentado a seguir.

No presente estudo, os dados brutos de radiação extraídos foram filtrados (Filtro R, R = Rede, ver Figura 3.3) pelo critério de códigos numéricos indicados pela rede para excluir dados suspeitos, ou seja, aqueles afetados em campo devido a fatores que podem alterar as medições e torna-las incorretas.

Segundo o SONDA, o processo de validação dos dados das estações consiste no método de controle de qualidade de dados adotado pela *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) do *World Radiation Monitoring Center* (WRMC), a qual apenas sinaliza aqueles dados suspeitos de estarem incorretos, gerando um código de validação para cada dado coletado. Esses códigos numéricos de 4 dígitos são armazenados e podem ser utilizados por meio de um critério estabelecido pelo usuário. Isto é, o usuário pode adotar o controle de qualidade recomendado pela rede em parte, de forma integral ou sem nenhum controle.

A rede estabelece avaliação para o resultado de cada uma das etapas aplicadas no controle de qualidade, que é interpretado da direita para a esquerda e classifica o valor medido dentro dos seguintes parâmetros: 0 - nenhum procedimento foi executado, 2 - dado suspeito de ser incorreto, 5 - procedimento não pode ser executado e 9 - dado de boa qualidade ou não suspeito.

Para a variável radiométrica radiação global horizontal, de interesse neste estudo, 3 algoritmos são avaliados, sendo que:

O primeiro (denominado Algoritmo 1) verifica inicialmente se o dado observado é fisicamente possível. Caso o dado tenha o desvio padrão diferente de zero e esteja dentro do limite mínimo imposto, este dado é considerado aceito. Nesta avaliação o limite do dado de radiação deve estar entre -4 W.m^{-2} e $S_a \cdot 1,5 \cdot \mu_0^{1,2} + 100$, sendo S_a a constante solar ajustada para distância Terra-Sol e $\mu_0 = \cos(\text{AZS})$, com AZS igual ao ângulo do zênite solar.

O segundo (designado Algoritmo 2) identifica se o dado é considerado extremamente raro, ou seja, o limite do dado de radiação deve ter avaliação entre -2 W.m^{-2} (mínimo) e $S_a \cdot 1,2 \cdot \mu_0^{1,2} + 50$ (máximo).

O terceiro e último algoritmo para esta variável radiométrica (nomeado Algoritmo 3) realiza a comparação entre sensores. Nesta análise a radiação solar (Global) / (Sum) deve estar entre $\pm 10\%$ de 1,0 para $\text{AZS} < 75^\circ$, $\text{Sum} > 50 \text{ W.m}^{-2}$ ou (Global) / (Sum) deve estar entre $\pm 15\%$ de 1,0 para $93^\circ > \text{AZS} > 75^\circ$, $\text{Sum} > 50 \text{ W.m}^{-2}$. Este teste não é possível para $\text{Sum} < 50 \text{ W.m}^{-2}$. Considerando que:

$$\text{Sum} = [\text{Difusa} + (\text{Direta Normal}) \cdot \mu_0]$$

Global = radiação solar medida por um piranômetro sem sombreador

Difusa = radiação solar medida por um piranômetro com sombreador

Direta Normal = componente direta normal da radiação solar incidente na superfície

Portanto, os quantificadores de 4 dígitos utilizados para aprovação no controle de qualidade do Filtro R e utilizados neste estudo foram 0999, 0599 ou 0099, sendo 0 (algoritmo 4: nenhum procedimento executado); 9, 5 ou 0 (algoritmo 3: aprovado, não suspeito, procedimento não pode ser executado ou nenhum procedimento executado); 9 (algoritmo 2: aprovado, não suspeito); e 9 (algoritmo 1: aprovado, não suspeito).

3.1.5. Controle de qualidade dos dados de radiação adotado no presente estudo

Os dados observacionais e do modelo GL passaram por um método de controle de qualidade para fins de garantir confiabilidade das informações, e também para proporcionar a discussão da acurácia do modelo para a estimativa da irradiância solar nas escalas diária e mensal.

O intervalo de dados de radiação média diária entre 0 a 400 W.m^{-2} representa adequadamente a variável sobre o Brasil, sendo assim, essa foi adotada no presente estudo (CEBALLOS; MACEDO, 2014). Dados que estão fora deste intervalo são considerados duvidosos e, portanto, desconsiderados.

Os seguintes critérios de filtragem de dados foram ainda aplicados no presente estudo para os dados de radiação observacionais e de satélite, inclusive para eliminar possíveis dados espúrios e não físicos. Importante mencionar que os dados observacionais do SONDA passaram anteriormente pelo filtro da rede (Seção 3.1.4).

Os dados diários da verdade terrestre (observações SONDA e SolRad-Net) passaram por dois filtros:

Filtro 1

- Os valores de irradiância solar negativos foram descartados;
- Período solar diário com mais de 2 horas sem dado teve média diária anulada.

Filtro 2

- Irradiâncias médias diárias fora do intervalo entre 20 e 400 W.m^{-2} foram removidas.

Os valores diários do modelo GL passaram pelo seguinte filtro:

Filtro 3

- A irradiância média diária obrigatoriamente deve situar-se no intervalo entre 20 e 400 W.m^{-2} .

Com esses dados foi possível realizar a avaliação diária e mensal do modelo, bem como a realização de cálculos estatísticos.

Adicionalmente foram realizados outros dois filtros nos valores mensais observacionais (OBS) e do modelo GL:

Filtro 4

- Diferença entre o dado diário do modelo e o observado não deve exceder 100 W.m^{-2} , ou seja, diferença $< 100 \text{ W.m}^{-2}$.

A partir desses dados foi possível realizar a avaliação de comparação diária e cálculos estatísticos.

O último filtro foi aplicado para construção dos pares mensais (GL, OBS).

Filtro 5

- Número de pares de dados diários de radiação (GL, OBS) no mês deve ser igual ou superior a 20.

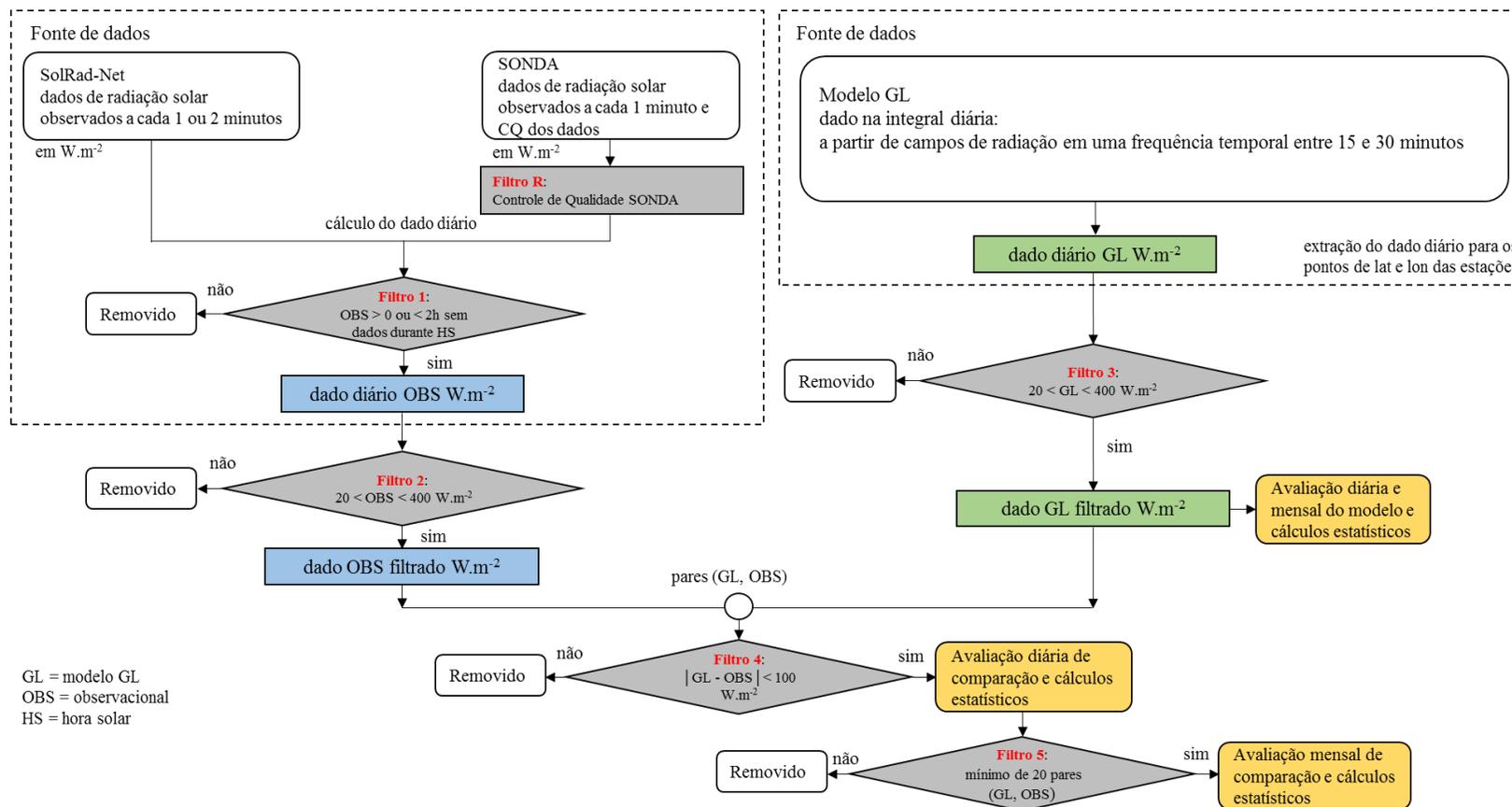
Com isso, foi possível realizar a avaliação de comparação mensal e cálculos estatísticos. Filtros similares foram adotados por Porfirio (2017), exceto a segunda condição do Filtro 1, a qual foi utilizada para excluir defeitos (ruídos) e ausência consequente de informação dos arquivos das estações. O fluxograma do controle de qualidade dos dados está apresentado na Figura 3.3, isto é, cenário geral dos filtros que foram aplicados para chegar na validação dos dados diários e mensais. Esta filtragem permitiu a exclusão de dados de radiação solar de qualidade duvidosa.

Figura 3.3 - Filtros aplicados no controle de qualidade dos dados observacionais da rede SONDA e SolRad-Net e dos dados do modelo GL.

Considerando: GL – modelo GL, OBS – observacional, HS – hora solar.

Filtros utilizados nos dados observacionais

Filtros utilizados nos dados do modelo GL



3.2. Comparação entre dados do GL1.2 e observacionais

Considerando que este é o primeiro trabalho a explorar a série de 20 anos de dados de radiação solar do modelo GL, para validar estes dados foram utilizadas observações de rede de superfície. O processo de validação baseia-se na estratégia de controle de qualidade dos dados, por isso precisa ser realizado com um conjunto de dados de superfície de alta qualidade, a fim de tornar o conjunto com elevado grau de aceitação e sobretudo confiável. Tal validação foi realizada a partir das estações solarimétricas da rede SONDA e da rede SolRad-Net. As redes de radiação solar com dados disponíveis foram apresentadas e detalhadas anteriormente. A Seção 3.1.5 explanou o uso de filtros para garantir qualidade nos dados.

A ideia desta etapa baseia-se não só na avaliação e verificação do comportamento dos dados de diferentes satélites GOES, mas também obter um entendimento da aplicação e limitação dos dados observacionais coletados.

O motivo principal desta comparação é proporcionar credibilidade nos dados de radiação estudados, seja na escala temporal diária ou mensal, no intuito de avaliar a série histórica ou na compreensão do conjunto, visto que estudos anteriores analisaram períodos curtos.

Além disso, a comparação direta dos dados é uma função básica de um bom projeto de pesquisa, principalmente por permitir obter a correlação do resultado por meio da comparação satisfatória entre dois ou mais conjuntos de diferentes variáveis dos grupos em estudo. Os índices estatísticos para avaliar a acurácia dos dados são descritos abaixo.

O *Mean Bias Error* (MBE) é um índice que compara o desvio médio da estimativa em relação aos valores medidos e pode ser positivo ou negativo. O MBE permite a detecção de tendências sistemáticas de subestimativa e superestimativa. A equação é a seguinte:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)}{N} \quad (3.1)$$

Onde o y é o valor estimado, z é o valor medido e N é o número total de medições.

O *Mean Absolute Error* (MAE) é um índice de desvio médio absoluto, sendo representado pela equação:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - z_i|}{N} \quad (3.2)$$

A *Root Mean Square Error* (RMSE), que é a raiz do erro quadrático médio, refere-se ao desvio da estimativa em relação às medições e é sempre positivo. O RMSE permite identificar as diferenças entre os valores estimados e medidos. O RMSE é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2}{N}} \quad (3.3)$$

Os cálculos de Desvio Padrão (DP) e R^2 devem ser calculados para um nível de confiança estabelecido para cada estudo, e dessa forma, o primeiro é uma medida de dispersão em torno da média de uma variável aleatória e o R^2 mede o grau da correlação entre duas variáveis dentro de um intervalo de confiança de valores numéricos, supondo o cumprimento da distribuição normal de Gauss. Estas análises permitem aferir os intervalos e avaliar a intensidade em que o modelo apresenta maior erro em relação aos valores medidos.

Este tipo de análise comparativa propõe especificar e avaliar as limitações do modelo na região do território brasileiro, isto é, a estudada. Os resultados estatísticos obtidos serão redigidos detalhadamente e avaliados, a fim de garantir uma base de dados confiável para futuras análises de variabilidade temporal e espacial.

3.3. Testes estatísticos para análise da variabilidade temporal de radiação solar

Analisar tendência, a homogeneidade e a estabilidade de dados é importante para compreender o comportamento temporal, além de possibilitar averiguar possíveis

descontinuidades ou desvios, e assim, possibilitar a tomada de decisões e a utilização dos dados em suas aplicações.

Neste estudo foi realizado um conjunto de testes estatísticos na série de dados, tais como: teste de tendência, teste de magnitude de tendência, teste t de Student, teste de homogeneidade e estimativa da anomalia padronizada, com o intuito de verificar a qualidade e homogeneidade da série, os quais serão demonstrados a seguir.

3.3.1. Teste de tendência

Após a seleção dos dados, foi realizada uma análise da variabilidade temporal das informações a partir de teste de tendência. A análise de tendência é um estudo estatístico que possibilita avaliar o comportamento de um determinado parâmetro em estudo ao longo do tempo, isto é, entender e analisar futuras projeções de uma medida em um determinado tempo estabelecido (ZHANG et al, 2009).

O teste inicialmente proposto por *Mann-Kendall* (MK) (KENDALL, 1955; MANN, 1945) é o mais comumente utilizado e sugerido pela OMM em séries temporais de dados ambientais, foi aplicado neste estudo com 5 e 10% de significância na avaliação da tendência dos dados.

O teste MK é robusto, sequencial e não-paramétrico, ou seja, diferente de um teste paramétrico que parte do pressuposto da necessidade de existência de distribuições apropriadas na amostra, como por exemplo, distribuição normal, homogeneidade dos dados e variáveis contínuas (WILKS, 2011). Além disso, segundo Zhang et al. 2009, este método possui a vantagem de não ser influenciado por séries não homogêneas ou mudanças abruptas, e também pode ser aplicado independentemente do tamanho da amostra de dados.

Neste trabalho, o teste MK foi realizado a partir das médias anuais, a fim de executar um tratamento prévio dos dados para não serem afetados por possíveis sazonalidades.

Além disso, foi verificado que a série apresenta mudança abrupta a partir do teste SNHT (Seção 3.3.4).

A técnica, que é comumente empregada para detectar tendências monotônicas em séries, consiste em calcular a variável estatística S a partir da somatória da diferença dos sinais - sgn em conjuntos, de todos valores de (x_i) em relação aos valores posteriores (x_j) com $j > i$, ou seja, basicamente comparar cada valor de uma série temporal com os valores subsequentes de forma sequencial, onde n é o número de dados do teste obtido ao longo de anos conforme a equação 3.4:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3.4)$$

Se n for maior ou igual a 10, a variável S pode ser comparada com uma distribuição normal, e a sua variância ($\text{VAR}(S)$) pode ser obtida a partir da equação abaixo:

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i)(i-1)(2i+5)}{18} \quad (3.5)$$

Em que: n é o número de valores para os quais os dados foram obtidos ao longo dos anos e t_i representa a quantidade de repetições de uma extensão i (por exemplo, uma série histórica com quatro valores iguais entre si teria 1 repetição de extensão igual a 4, ou $t_i = 1$ e $i = 4$).

O índice Z_{MK} segue a distribuição normal, na qual a sua média é igual a zero. Assim, um sinal positivo (negativo) de S indica uma tendência crescente (decrescente) do índice Z de dispersão dos dados, que é calculado normalizando S e extraíndo a raiz quadrada da variância, como dado a seguir:

$$Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \quad , \text{ para } S > 0 \quad (3.6)$$

$$Z_{MK} = 0 \quad , \text{ para } S = 0 \quad (3.7)$$

$$Z_{MK} = \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} \quad , \text{ para } S < 0 \quad (3.8)$$

Por se tratar de um teste bicaudal e como o método baseia-se em rejeitar ou não a hipótese nula, ou seja, de que não exista tendência na série de dados, adota-se um nível de significância (α). A hipótese nula é usualmente formada com o objetivo de ser rejeitada. A rejeição da hipótese nula envolve a aceitação de outra hipótese denominada de alternativa. Portanto, é preciso que o valor absoluto de Z_{MK} seja superior a $Z_{\alpha/2}$, valor crítico de Z a partir da tabela padrão normal, para rejeitar a hipótese nula. Neste trabalho para $\alpha = 5\%$ (10%), então $Z_{0,05/2} = Z_{0,025} = 1,96$ ($Z_{0,10/2} = Z_{0,05} = 1,64$), então será considerada que a série tenha uma tendência significativa ao nível de 5% (10%) caso $|Z_{MK}| > 1,96$ ($|Z_{MK}| > 1,64$).

Baseado nos resultados alcançados é possível identificar e avaliar as tendências e as significâncias das séries para buscar evidências de ampliação ou diminuição da radiação solar.

3.3.2. Teste de magnitude de tendência

O Sen's slope é um teste que calcula a magnitude de uma tendência por meio da inclinação, ou seja, da taxa de variação linear (POHLERT, 2016).

O teste considera a mediana de todas as combinações possíveis do conjunto de dados, como dado pela equação 3.9:

$$\text{Sen's slope} = \text{Mediana } d_k = \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (3.9)$$

Para $1 \leq i < j \leq n$, onde d_k é o conjunto de inclinações lineares, mediana d_k o parâmetro Sen's slope, x_j e x_i os valores sequenciais de dados e n é o número de dados.

Quando o resultado do Sen's slope apresenta valor positivo, indica tendência de aumento, e para negativo, de diminuição. Logo, quanto maior o parâmetro, mais

expressiva será essa taxa de variação e, por consequência, maior é a magnitude da tendência.

3.3.3. Teste t de Student

Além do teste MK foi utilizado o teste t de Student. Este é um teste de hipótese que consiste em rejeitar ou não uma hipótese nula definida e consequentemente formular uma hipótese alternativa. Como o teste exige uma distribuição de probabilidade específica para a variável aleatória, no caso a distribuição normal, este é classificado como paramétrico.

A estatística do teste é aplicada à função densidade de probabilidade da distribuição t de Student, indicando o nível de confiança $(1-\alpha)$ e o p-valor bicaudal para determinado t, e depende do número de graus de liberdade para cálculo da variância, o qual está associado ao tamanho das amostras e à quantidade do grupo de dados. Os valores não são significantes no nível de significância α (hipótese nula).

A distribuição t de Student é mais concentrada na média quanto maior o número de graus de liberdade, e se aproxima da distribuição normal quando seu grau de liberdade tende ao infinito.

O teste é usado quando as amostras comparadas possuem tamanhos e variâncias diferentes e a estatística é determinada conforme as equações 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13.

$$\bar{x}_{1,2} = \frac{\sum x_{1,2}}{n_{1,2}} \quad (3.10)$$

$$Sx_{1,2}^2 = \frac{\sum x_{1,2}^2}{n_{1,2}} - \bar{x}_{1,2}^2 \quad (3.11)$$

$$Sx_1x_2 = \sqrt{\frac{(n_1-1)Sx_1^2 + (n_2-1)Sx_2^2}{n_1+n_2-2} \left(\frac{n_1+n_2}{n_1n_2}\right)} \quad (3.12)$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{Sx_{1,2}} \quad (3.13)$$

Onde: 1 e 2 são os grupos independentes, $x_{1,2}$ a variável, $\bar{x}_{1,2}$ a média, $n_{1,2}$ o tamanho da amostra, $Sx_{1,2}$ as variâncias, $Sx_{1,2}$ a variância combinada.

Lembrando que se a hipótese nula é verdadeira, t é um valor de uma variável aleatória que segue uma distribuição t de Student com $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade. Neste trabalho serão adotados níveis de confiança de 95 e 90%. (DE GOIS et al., 2016). Vale ressaltar ainda, que os grupos de dados comparados neste teste foram as médias anuais dos 10 primeiros e 10 últimos anos da série de 20 anos.

3.3.4. Teste de homogeneidade

Pretende-se ainda avaliar os dados do modelo GL1.2 em termos de homogeneidade e estabilidade temporal, ou seja, realizar uma avaliação das características dos dados, que nesta longa série provêm de diferentes satélites.

Neste estudo será aplicado o teste *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT) o qual foi desenvolvido e aplicado a dados de precipitação por Alexandersson (1986) considerando a existência de uma tendência linear de comprimento arbitrário, com capacidade de detectar mudanças repentinas de dados de intercomparação.

Como deriva de uma estatística t, teste de hipótese usado quando não se conhece o desvio padrão e estima-se o erro baseado no valor amostral, então as variações são calculadas na média aritmética da série para Z_1 (sequência de dados antes - v) e para Z_2 (sequência de dados depois - v + 1) de cada intervalo de meses durante todo o período n. Neste estudo foi utilizada uma série de dados com 12 valores (meses). Valores médios antes e depois de um intervalo de tempo com grandes alterações, indicam a possibilidade de quebras na série temporal, originando valores correspondentes a máximos de T_v (função estatística do teste). Estas interrupções detectadas no teste apontam pontos de não homogeneidade e descontinuidade na série temporal (AGUILAR et al., 2003).

Em resumo na forma mais simples, a estatística do SNHT é obtido como:

$$T_v = v (Z_1)^2 + (n - v)(Z_2)^2 \quad (3.14)$$

Outros detalhes do método podem ser verificados em Alexandersson e Moberg (1997) e Aguilar et al. (2003).

Neste estudo foi utilizada a versão automática do teste do pacote SNHT, desenvolvida no projeto CRAN-R por Browning e Schneider (2017) e disponível em <https://cran.r-project.org/web/packages/snht/index.html>.

Uma das técnicas de aplicação é a da diferença relativa, usada para comparar os valores pontuais individuais e seus desvios-padrão com a média de todas as medidas.

As pequenas variações na diferença relativa entre as posições no espaço, em função do tempo, indicam estabilidade temporal.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} 100 \quad (3.15)$$

Onde s é o desvio padrão, \bar{x} a média dos dados e CV o coeficiente de variação.

O grau da variabilidade dos dados para o coeficiente de variação na diferença relativa é baseado nos intervalos que consideram três níveis: baixa ($CV < 12\%$); média ($12\% \leq CV \leq 60\%$) e alta ($CV > 60\%$) variabilidade (SALVADOR et al. 2012).

3.4. Estimativa de anomalia padronizada da série histórica temporal do GL1.2

Considerando os testes estatísticos propostos, foi calculada a anomalia padronizada anual com a finalidade de compreender as variações interanuais na série.

A anomalia padronizada é calculada pela média do ano menos a média anual climatológica, aquela que considera todo o período exceto a do ano avaliado, dividido

pelo DP anual médio climatológico. Para o período analisado, considera-se i o ano sequencial, variando $1 \leq i \leq n$, e n o número total de anos da série.

Procurou-se verificar se as variações interanuais poderiam estar associadas a diferentes períodos de observações de cada satélite ou ainda relacionados à variabilidade climática ao longo do ano.

A variabilidade interanual do clima na América do Sul está principalmente associada às modulações de temperatura da superfície e dos ventos nos oceanos adjacentes. Mudanças nas condições de temperatura da superfície dos oceanos tropicais modificam remotamente a circulação e a convecção, e conseqüentemente impactam na formação de nuvens e na incidência da radiação solar à superfície. O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e o dipolo do Atlântico Tropical Norte são dois dos principais fatores climáticos que geram a variabilidade interanual nos regimes de chuva do Brasil (ANDREOLI et al., 2017; TEDESCHI et al., 2016; COELHO et al., 2012). Oliveira (2001) descreve em detalhes as características físicas e impactos do evento ENOS. Resumidamente, segundo o referido autor, o ENOS é um fenômeno atmosférico-oceânico caracterizado por um aquecimento (resfriamento) anormal das águas superficiais no Oceano Pacífico Tropical. Este fenômeno apresenta duas fases: El Niño (fase quente) e La Niña (fase fria). A circulação do ar que ascende do Pacífico Equatorial Central indo na direção leste em altos níveis da atmosfera e desce no Pacífico Leste em conjunto com os ventos alísios em baixos níveis da atmosfera é denominada de células de circulação de Walker. Como as águas do oceano no Pacífico Oeste são mais quentes, há mais evaporação e formação de nuvens em uma grande área do oceano favorecendo esta circulação. Em anos de El Niño os ventos alísios enfraquecem e com isso, a água de todo o Oceano Pacífico Equatorial começa a aquecer gerando evaporação e formação de nuvens, assim, a célula de Walker torna-se bipartida sobre toda esta extensão do oceano. O ar que desce dos níveis mais altos da troposfera inibe a formação de nuvens devido a supressão da convecção e diminuição da precipitação, provocando tipicamente a ocorrência de seca no norte, leste e oeste da Amazônia e nordeste do Brasil. Por outro lado, o ENOS gera grande quantidade de chuva acumulada no sul do país (GRIMM, 2003). O fenômeno La

Niña é responsável pelo aumento de precipitação nas regiões norte e nordeste, enquanto que a região sul apresenta severas secas (GRIMM, 2004).

O Oceano Atlântico Tropical também apresenta papel importante na variabilidade interanual climática da América do Sul, principalmente no norte e nordeste. O fenômeno de dipolo do Atlântico é resultante da interação entre oceano e atmosfera, e que pode interferir na formação de nuvens (aumentando ou diminuindo a nebulosidade) e influenciar os índices pluviométricos no leste da Amazônia e litoral norte e nordeste brasileiro. Esse fenômeno é identificado como uma mudança anormal na temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Tropical. Geralmente, quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais quentes que a parte Tropical Sul, existem movimentos descendentes transportando ar frio e seco dos altos níveis da atmosfera sobre a região do Brasil, inibindo a formação de nuvens, podendo causar secas. Por outro lado, quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais frias que as do Sul ocorre aumento nos movimentos ascendentes sobre o leste da Amazônia e litoral norte brasileiro, aumentando tanto a formação de nuvens quanto os índices pluviométricos (NOBRE; SHUKLA, 1996; MOURA; SHUKLA, 1981; HASTENRATH; HELLER, 1977). Como pode se verificar, esses fenômenos geralmente descritos em termos do efeito nas chuvas, também podem alterar a fração de nebulosidade e conseqüentemente a quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície. Sendo assim, buscou-se fazer um breve resumo das condições climáticas durante o período da série histórica do GL.

Com relação à variabilidade, analisou também se as anomalias poderiam estar relacionadas a eventos ENOS. Este fenômeno em particular foi escolhido por ser um evento interanual de impacto específico na América do Sul, geralmente discutido em termos de precipitação e temperatura.

Este estudo não teve o objetivo de realizar uma análise detalhada sobre o evento ENOS e radiação solar, apenas realizou essa análise para compreender melhor os resultados encontrados a partir dos testes de homogeneidade, identificados pelo teste SNHT. Especificamente, verificou-se que as anomalias de radiação poderiam estar associadas a eventos climáticos. Esta associação é apenas avaliada se as anomalias significativas

(acima de 1 desvio padrão) correspondem aos períodos em que ocorreram os eventos. Não foi realizado nenhum teste estatístico para verificar numericamente a possível relação.

A Tabela 3.4 mostra um panorama das características dos tipos de oscilação nos pares anuais do período entre 1998-2017, o qual está baseado no padrão utilizado pela NOAA para identificação das intensidades dos fenômenos.

Outro ponto que merece atenção para avaliação temporal da série é com relação a investigação da tendência e sua respectiva significância, ou seja, identificar se os dados de radiação solar obtidos são significativos nas estações estudadas e conseqüentemente obter uma perspectiva como um todo.

Tabela 3.4 - Período com pares anuais e intensidades dos eventos El Niño e La Niña.

Linhas sem informação referem-se aos anos neutros.

Período	Tipo Oscilação Sul-El Niño	
	El Niño	La Niña
1997 - 1998	muito forte	
1998 - 1999		forte
1999 - 2000		forte
2000 - 2001		fraco
2001 - 2002		
2002 - 2003	moderado	
2003 - 2004		
2004 - 2005	fraco	
2005 - 2006		fraco
2006 - 2007	fraco	
2007 - 2008		forte
2008 - 2009		fraco
2009 - 2010	moderado	
2010 - 2011		forte
2011 - 2012		moderado
2012 - 2013		
2013 - 2014		
2014 - 2015	fraco	
2015 - 2016	muito forte	
2016 - 2017		fraco
2017 - 2018		fraco

Fonte: Adaptada de NOAA (2019).

4. RESULTADOS

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados obtidos referentes às análises da série da radiação solar estudada.

Os dados estatísticos serão apresentados em gráficos de barras para melhor visualização, no entanto, os valores numéricos ou complementares serão parte dos apêndices conforme indicado nas figuras. As estações da rede SolRad-Net serão indicadas com asterisco (*) nas figuras e tabelas para melhor identificação.

4.1. Análise da disponibilidade dos dados de radiação

Esta seção visa compreender a distribuição temporal dos dados gerados e disponibilizados, haja vista ser um fator relevante e essencial para as análises e testes pretendidos. Os resultados dos dados diários do modelo GL1.2 (Figura 4.1) demonstram que todas as estações possuem elevados percentuais em quantidades de dados. A estação de Sombrio mesmo tendo a menor quantidade de dados de satélites entre todas as estações (6599 dados), apresenta 90,3% dos dados possíveis nos 20 anos estudados (7305 dias), que corresponde aproximadamente 94,0% dos dados disponíveis e filtrados. Isto denota que a DSA/CPTEC-INPE possui um acervo extenso de dados de satélites disponíveis em diversas localidades; o mesmo não é observado pelas estações de superfície, como será apresentado adiante.

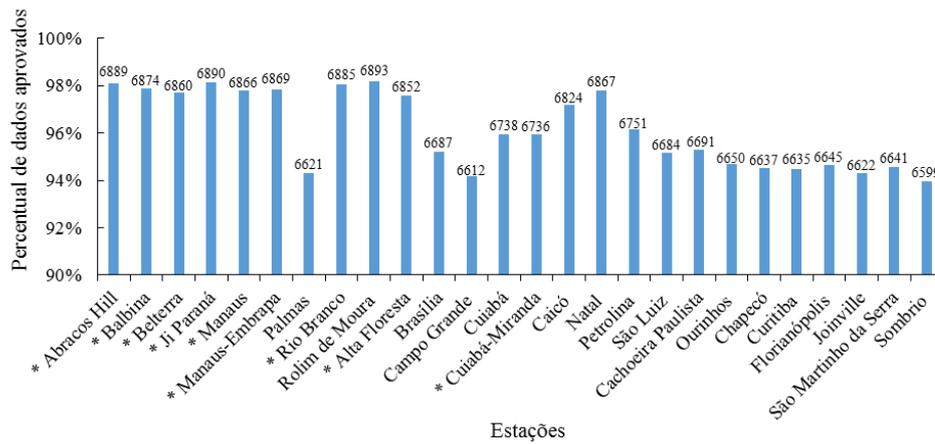
Com relação aos resultados dos dados diários de superfície, a Figura 4.2 apresenta a quantidade de dados diários aprovados disponíveis, bem como o percentual de dados observacionais aprovados em cada um dos filtros utilizados. Por exemplo, a estação Curitiba possui 413 dados registrados da rede aprovados pelos Filtros R e 1 (100,0%), 412 aprovados no Filtro 2 (99,8%), 385 aprovados no Filtro 4 (93,2%) e 364 aprovados no Filtro 5 (88,1%). A estação Rolim de Moura não obteve nenhum dado aprovado nos Filtros R e 1. Até o Filtro 4, é possível observar estações com maiores percentuais de aprovação (Manaus-Embrapa - 97,2% e Cuiabá - 95,5%) e com menores índices (Sombrio - 88,4% e Belterra - 89,3%). Dentre as 26 estações, 22 delas tiveram

percentual final de dados disponíveis aprovados maior do que 90,0% até o Filtro 4, e 19 acima de 80% até o Filtro 5, neste último caso, para realização do cálculo da média mensal.

Verificando os resultados dos dados mensais observacionais nas estações observa-se claramente na Figura 4.3 uma queda dos dados disponíveis para os filtrados, mas todas as estações possuem um percentual de aprovação final acima de 50,0% exceto Rolim de Moura, que não dispunha de dados diários para cálculo da média mensal. Por outro lado, verifica-se que para essa estação, dados de satélite que seguem os critérios dos filtros correspondem uma amostra de 98,2% de dados diários disponível no período de 20 anos. Além disso, 18 estações tiveram mais de 70% dos dados mensais aprovados após filtragem e logo podem ser utilizados (Balbina, Ji Paraná, Palmas, Rio Branco, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Cuiabá-Miranda, Caicó, Petrolina, São Luiz, Cachoeira Paulista, Chapecó, Curitiba, Florianópolis, Joinville, São Martinho da Serra e Sombrio).

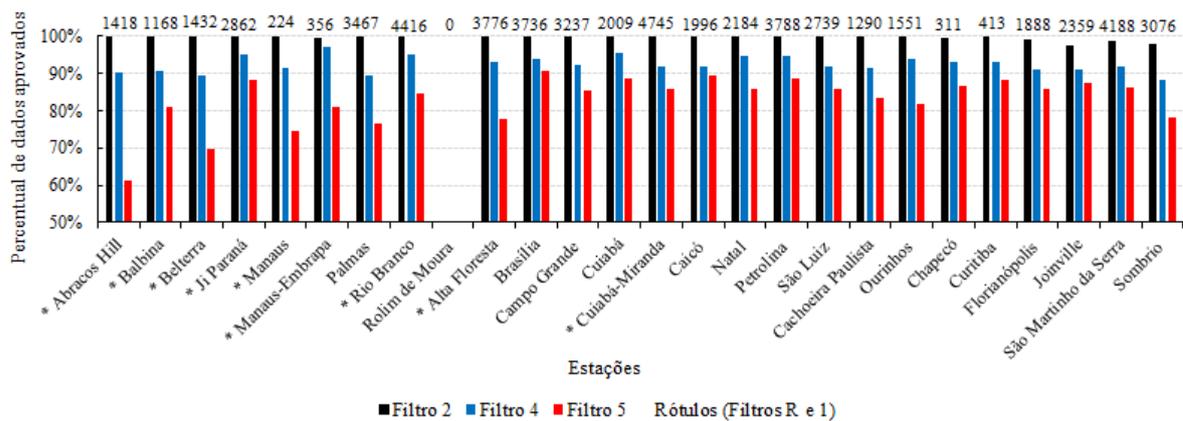
Com base nestes resultados, verifica-se que os dados de superfície possuem um satisfatório acervo de dados disponíveis nas variadas localidades estudadas. No entanto, apresenta períodos longos sem dados de observação. Períodos interrompidos de dados observacionais poderiam prejudicar análise climática, por exemplo. Por outro lado, dados de satélite tendem a preencher essa lacuna de falta de dados para análise climática. A quantidade de informações observacionais apresentada nas Figuras 4.2 e 4.3 será comparada com os dados disponíveis pelo modelo GL1.2 nas próximas seções. A redução de dados na filtragem se deve ao fato do rigoroso critério utilizado, ver Seções 3.1.3 à 3.1.5.

Figura 4.1 - Quantidade de dados diários do modelo GL. Os rótulos são o total de dados filtrados conforme discutido na Seção 3.1.5 e a escala do percentual de dados aprovados é apresentada de 90 a 100%. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.4.



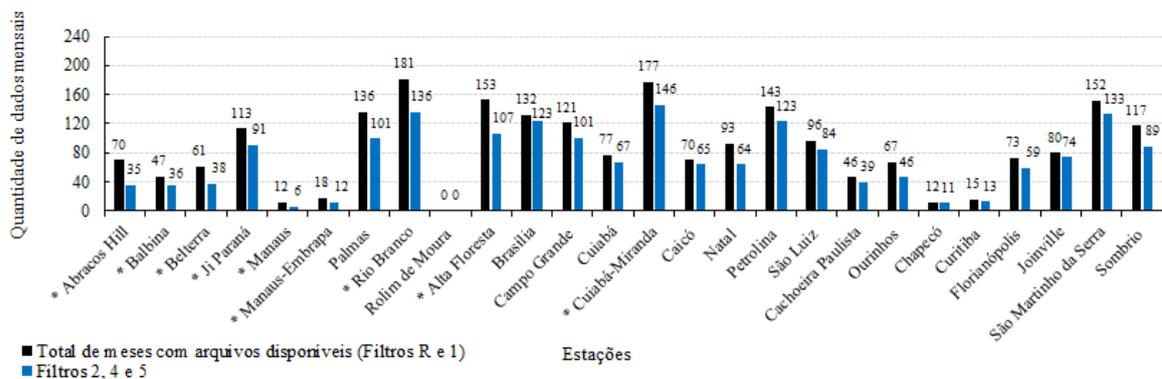
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.2 - Percentual de dados diários observados de radiação solar nas estações de superfície. Considerando que os dados aprovados na rede (após Filtros R e 1) são 100% e que no Filtro 5 estão somente os dados diários possíveis de serem comparados mensalmente com os do GL. Os rótulos são o total de dados disponíveis (100%). Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.4.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - Quantidade de dados mensais de radiação solar observado para cada estação. Considerando que o total de meses com arquivos disponíveis na rede são 100%, após Filtros R e 1. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.5.



Fonte: Produção do autor.

4.2. Avaliação dos dados de irradiância estimados pelo GL

A avaliação é realizada em termos de dados médios diários e mensais, sendo assim, apresentados nesta sequência nas seções abaixo.

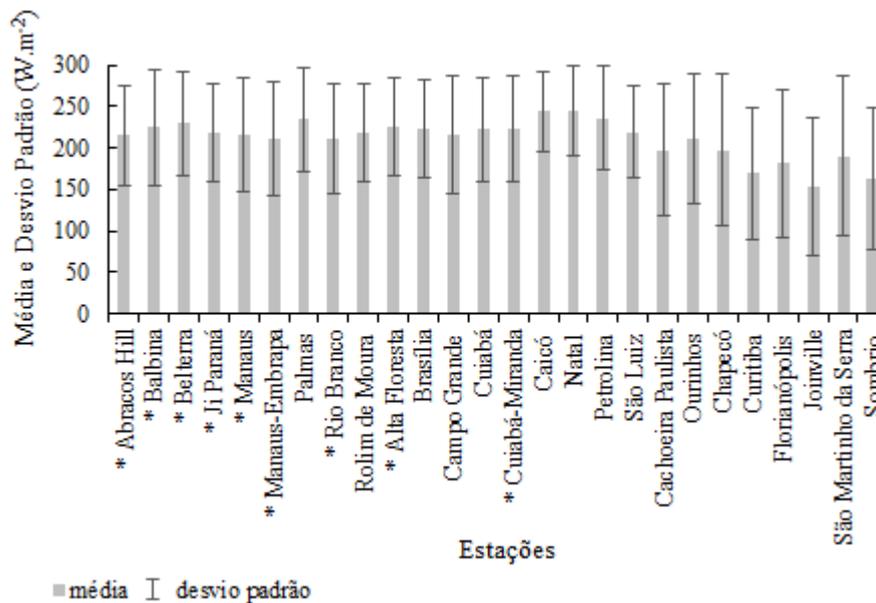
4.2.1. Análise na escala diária

Foram comparados dados de irradiância solar diária incidente à superfície para 26 estações, porém a estação Rolim de Moura não dispunha de dados observacionais diários para estimar as estatísticas. Assim, esta estação será inserida apenas para identificar a falta de dados observacionais seguindo os critérios adotados neste estudo.

Inicialmente, utilizando todos os dados diários em uma única estatística, foram obtidos a média e o desvio padrão das estimativas de irradiância do modelo GL na versão 1.2 para o período entre 1998-2017 nas 26 estações. Na Figura 4.4 é possível observar os valores de irradiância média em 20 anos com máximo de $244,6 \text{ W.m}^{-2}$ nas estações de Caicó e Natal, na região nordeste, e mínimo de $152,8 \text{ W.m}^{-2}$ em Joinville, na região sul. No que concerne aos valores de média de todas as estações, a irradiância média vale $211,5 \text{ W.m}^{-2}$. Por regiões geográficas foram obtidas as seguintes médias: norte ($220,0 \text{ W.m}^{-2}$), centro-oeste ($222,3 \text{ W.m}^{-2}$), nordeste ($236,2 \text{ W.m}^{-2}$), sudeste ($204,2 \text{ W.m}^{-2}$) e sul ($175,7 \text{ W.m}^{-2}$).

Em relação ao DP, incluindo o ciclo anual, o resultado médio em todas as estações encontra-se na ordem de $69,1 \text{ W.m}^{-2}$, e para os resultados regionais, os mais expressivos são observados para as regiões sudeste ($78,5 \text{ W.m}^{-2}$) e sul ($87,4 \text{ W.m}^{-2}$). Como o DP representa a variabilidade, que contempla o ciclo anual e as dispersões no entorno, tal fato é esperado para os estados destas regiões, os quais possuem uma maior amplitude na irradiância média. As outras regiões, norte, centro-oeste e nordeste, alcançaram médias de DP de $64,0$, $63,4$ e $55,2 \text{ W.m}^{-2}$ respectivamente. O maior valor de DP foi obtido na estação de São Martinho da Serra ($96,2 \text{ W.m}^{-2}$) na região sul e o menor foi encontrado na estação de Caicó no nordeste com $48,5 \text{ W.m}^{-2}$.

Figura 4.4 - Média e DP da irradiância solar média em 20 anos do modelo GL utilizando dados diários. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.6.



Fonte: Produção do autor.

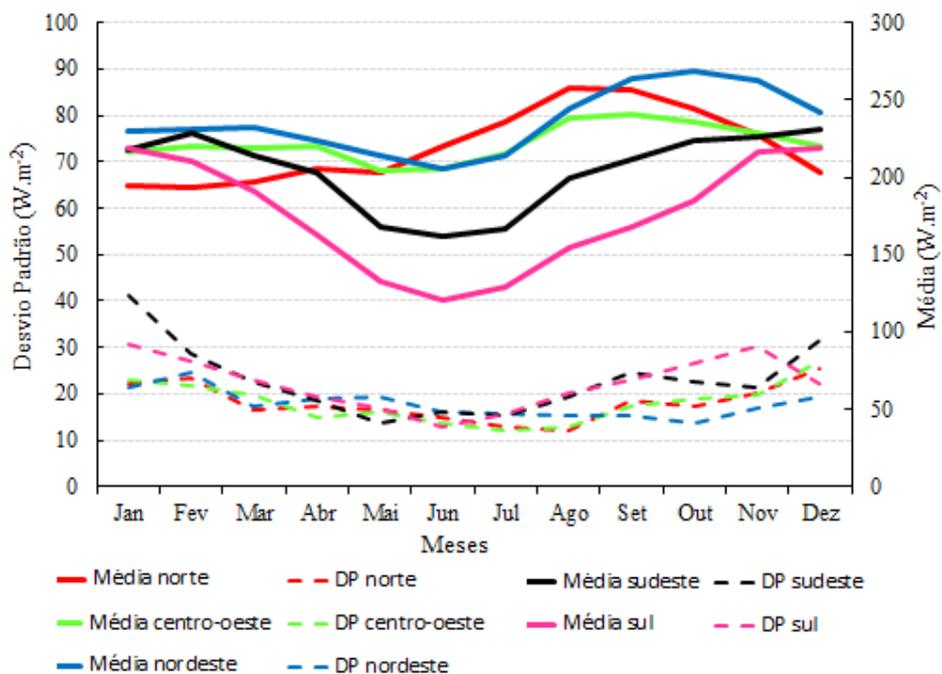
A Figura 4.5 apresenta o ciclo anual dos valores da média e do desvio padrão da irradiância do GL no período estudado por região geográfica. A média por região foi calculada utilizando os dados do GL no ponto das estações estudadas. Verifica-se que as regiões sul e sudeste, o comportamento da radiação solar segue principalmente a geometria de iluminação do planeta Terra. No período de inverno (verão), a iluminação solar apresenta maiores (menores) ângulos de incidência, diminuindo (aumentando) a quantidade de radiação por unidade de área nessas localizações.

Nordeste, norte e centro-oeste apresentam menor variabilidade anual, sendo que durante os meses de verão na região norte observa-se valores mais baixos de radiação. Esse comportamento está associado ao período em que há deslocamento do Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) mais ao sul perto do Equador. Essa zona de convergência, apresenta banda de nebulosidade, responsáveis pela convecção, que diminui a quantidade de radiação incidente à superfície.

Os desvios padrões são praticamente constantes ao longo do ano, e menores do que aqueles observados por estação na Figura 4.4, a qual considera o ciclo anual. As regiões norte, centro-oeste e sudeste, que são fortemente influenciadas por aerossóis de queimadas, possuem comportamento no DP muito parecidos para os meses entre agosto- outubro, embora o GL1.2 não inclua o aerossol.

Os resultados de média e desvio padrão, a partir de dados diários de cada uma das estações e para as regiões geográficas, podem ser úteis na caracterização do clima da radiação solar nas regiões que apresentam dados observacionais de radiação. Importante mencionar que períodos longos descontínuos das observações de algumas das estações radiométricas aqui utilizadas podem limitar a geração da climatologia da radiação para estas localidades.

Figura 4.5 - Média e DP da irradiância solar média diária no período de 20 anos separada por mês em cada região. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.6.



Fonte: Produção do autor.

A avaliação das estimativas de irradiância solar média pelo GL1.2 para cada uma das estações está nas Figuras 4.6 e 4.7. Os resultados estatísticos das irradiâncias médias diárias apresentam MBE da ordem de $8,4 \text{ W.m}^{-2}$, o MAE de $22,4 \text{ W.m}^{-2}$ e o RMSE de $28,3 \text{ W.m}^{-2}$, considerando as 25 estações com presença de dados. O coeficiente de determinação médio diário em todas as estações é de 0,85.

Com relação aos valores médios observados de RMSE e R^2 diários por regiões tem-se: norte ($34,1 \text{ W.m}^{-2}$, 0,81), centro-oeste ($26,8 \text{ W.m}^{-2}$, 0,84), nordeste ($24,7 \text{ W.m}^{-2}$, 0,81), sudeste ($23,7 \text{ W.m}^{-2}$, 0,91) e sul ($25,6 \text{ W.m}^{-2}$, 0,93). A região norte possui o resultado mais pronunciado de RMSE, possivelmente por estar sendo induzido pela maior presença de aerossóis na atmosfera e assumir refletância mínima do solo de 0,09 (PORFIRIO, 2017; CEBALLOS et al., 2004), que na condição geral deveria ser entre 0,04 e 0,05. Por isso, nesta região o resultado está sendo superestimado.

Os valores de RMSE diário variaram entre $19,7$ e $39,3 \text{ W.m}^{-2}$, para Curitiba e Belterra respectivamente, porém somente as estações de Abracos Hill ($34,4 \text{ W.m}^{-2}$), Balbina ($39,3 \text{ W.m}^{-2}$), Belterra ($38,6 \text{ W.m}^{-2}$), Manaus ($31,9 \text{ W.m}^{-2}$), Manaus-Embrapa ($32,1 \text{ W.m}^{-2}$), Palmas ($35,5 \text{ W.m}^{-2}$), Rio Branco ($31,4 \text{ W.m}^{-2}$), Alta Floresta ($33,7 \text{ W.m}^{-2}$) e Joinville ($32,7 \text{ W.m}^{-2}$) tiveram resultado ultrapassando o limiar de $30,0 \text{ W.m}^{-2}$, sendo 7 destas localizadas na região norte.

Baseado nos coeficientes de determinação encontrados, os resultados demonstram boa performance do modelo com R^2 médio diário geral de 0,85, sendo os menores resultados encontrados nas estações de Caicó (0,70) e Abracos Hill (0,71), e o maior de 0,95 nas estações de Curitiba e São Martinho da Serra. Tendo em vista as 25 estações analisadas, 76% delas possuem valores de R^2 superiores a 0,80.

É importante notar que valores de MBE elevados (superiores a 20 W.m^{-2}) correspondem apenas às estações de Palmas e Manaus-Embrapa, ou seja, 8% dos casos avaliados, e são observados na região norte. As estações Natal, Cachoeira Paulista, Chapecó, Curitiba e São Martinho da Serra tiveram seus resultados indicando subestimativa.

O MAE, que é utilizado para melhor quantificar a diferença relativa entre o dado estimado e o dado observado, teve os resultados mais discrepantes em Balbina (32,3 W.m⁻²), Belterra (31,9 W.m⁻²) e Palmas (30,0 W.m⁻²), sendo que o valor médio das estações foi de 22,4 W.m⁻².

A Figura 4.8 mostra histogramas do desvio entre a irradiância estimada pelo modelo GL e a medida para 10 estações, sendo 2 de cada uma das regiões do Brasil. As figuras incluem os valores médios do MBE e o DP do MBE, ou seja, *Standard Deviation Difference* (SDD) (ambos em W.m⁻²) dos dados de cada estação. Pode-se observar de maneira clara que as distribuições são assimétricas e algumas bimodais, mas encontram-se ligeiramente deslocadas para valores positivos em quase todos os casos. Considerando as frequências acumuladas apresentadas nos histogramas dos desvios, nota-se que aproximadamente 80% das diferenças observadas nos dados diários é positiva na região norte e nordeste. As estações da região centro-oeste (Brasília), sudeste e sul apresentadas registram inflexões de frequência acumulada em aproximadamente 50%, isto é, com MBE mais próximos de zero.

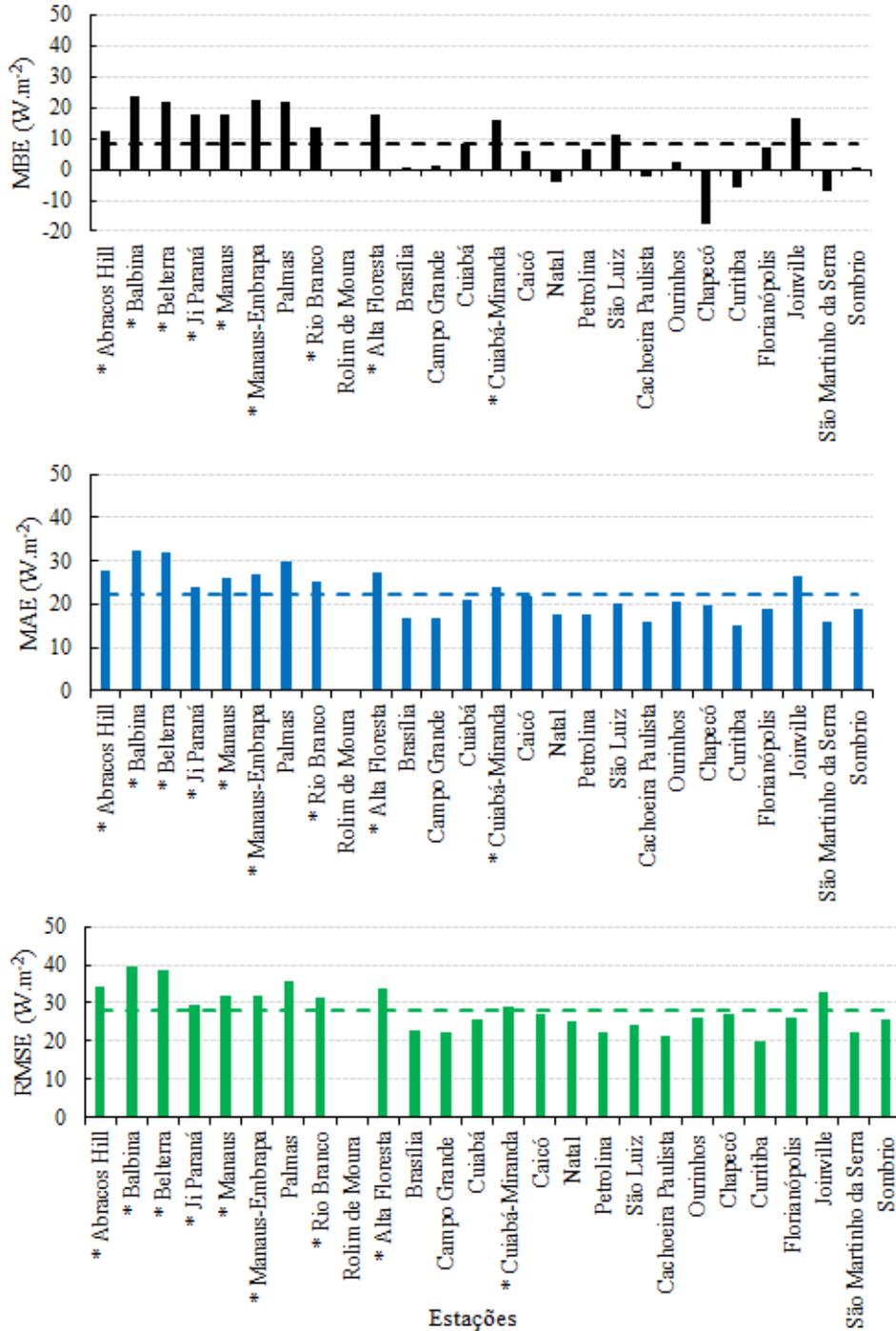
A Figura 4.9 apresenta os diagramas de dispersão entre valores diários de irradiância média estimados pelo modelo GL e medidos para cada uma das regiões brasileiras.

Para cada diagrama de dispersão, é indicado o coeficiente de determinação, a equação da reta entre as variáveis analisadas e a quantidade de dados diários utilizados. A dispersão dos pontos está associada a uma estimativa ideal pelo espalhamento em torno da diagonal central. Foi considerado estações de verão, outono, inverno e primavera os meses entre dezembro-fevereiro (DJF), março-maio (MAM), junho-agosto (JJA) e setembro-novembro (SON), respectivamente.

No geral, os resultados denotam que o modelo apresenta dispersão e estimativas distribuídas próximas da reta diagonal, porém apresentam tendência em superestimar a verdade terrestre (exceto um caso da região sul), ou seja, linha de tendência acima da diagonal (1:1). Contudo, na região norte o modelo GL tende a superestimar de forma mais pronunciada. Os erros apresentados no norte e centro-oeste são sistemáticos e fica

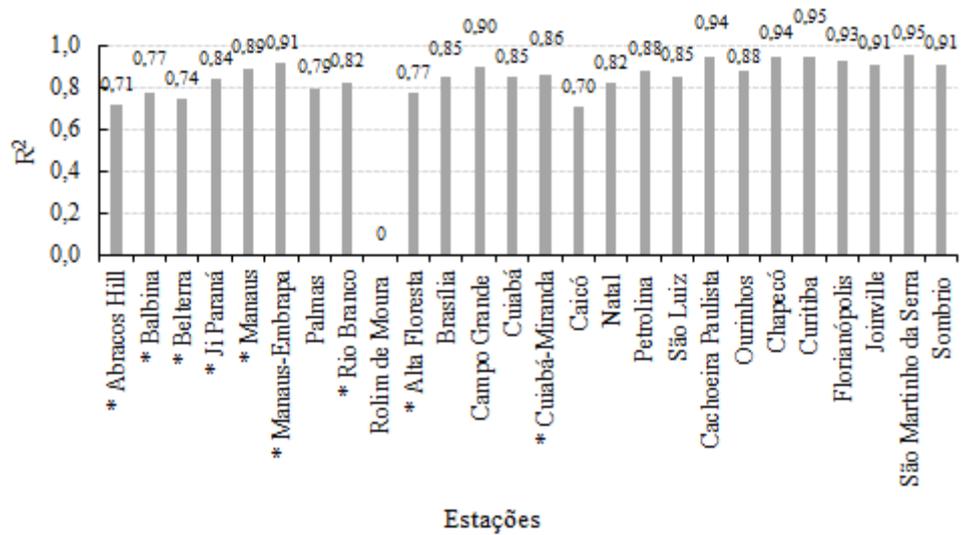
evidente bastante concentrado nos meses de picos de queimadas entre setembro-novembro (ROSÁRIO, 2011).

Figura 4.6 - Valores de MBE, MAE e RMSE na análise dos dados do GL com dados diários nas estações de superfície. A linha em tracejado indica o valor médio de todas as estações. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.



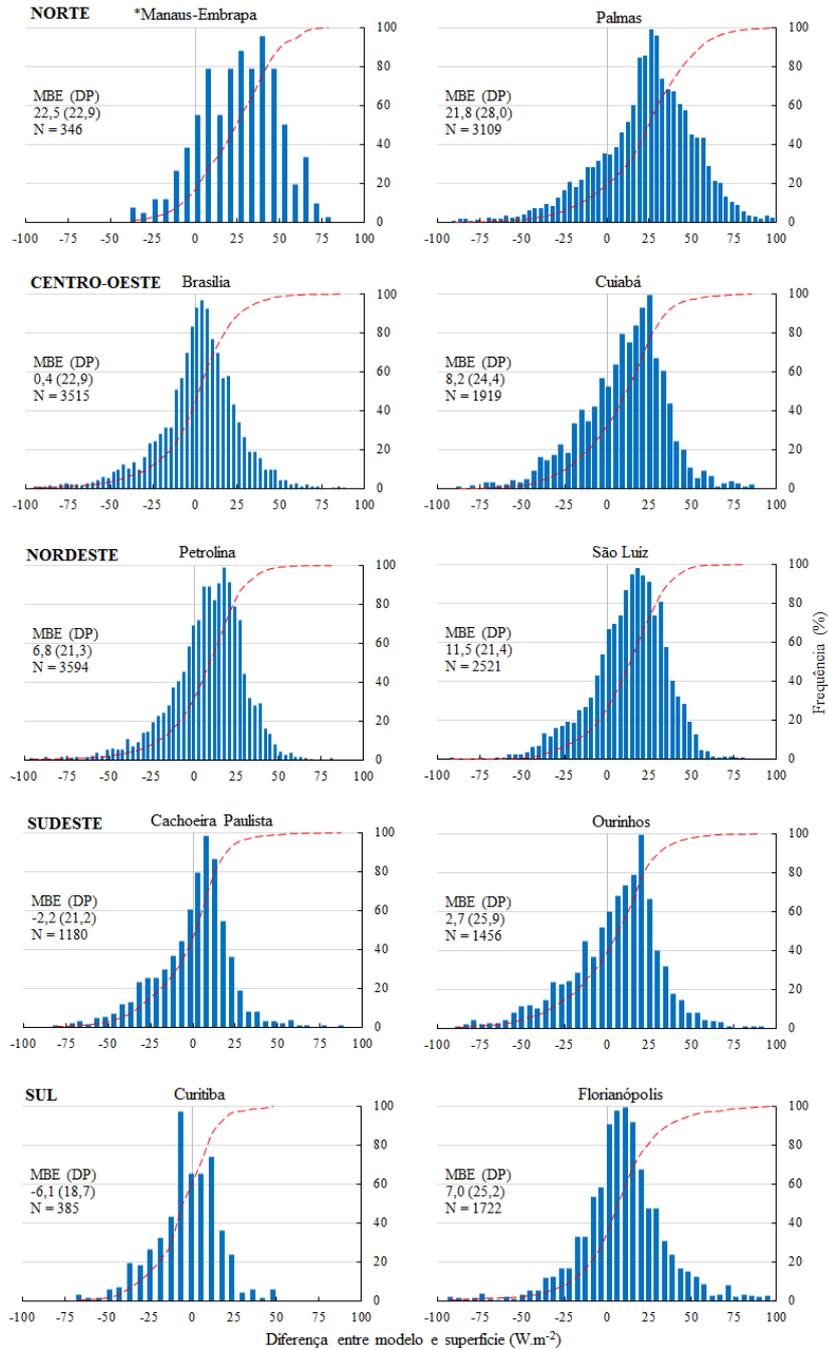
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.7 - Estatísticas dos coeficientes de determinação (R^2) diários para cada estação de superfície. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.



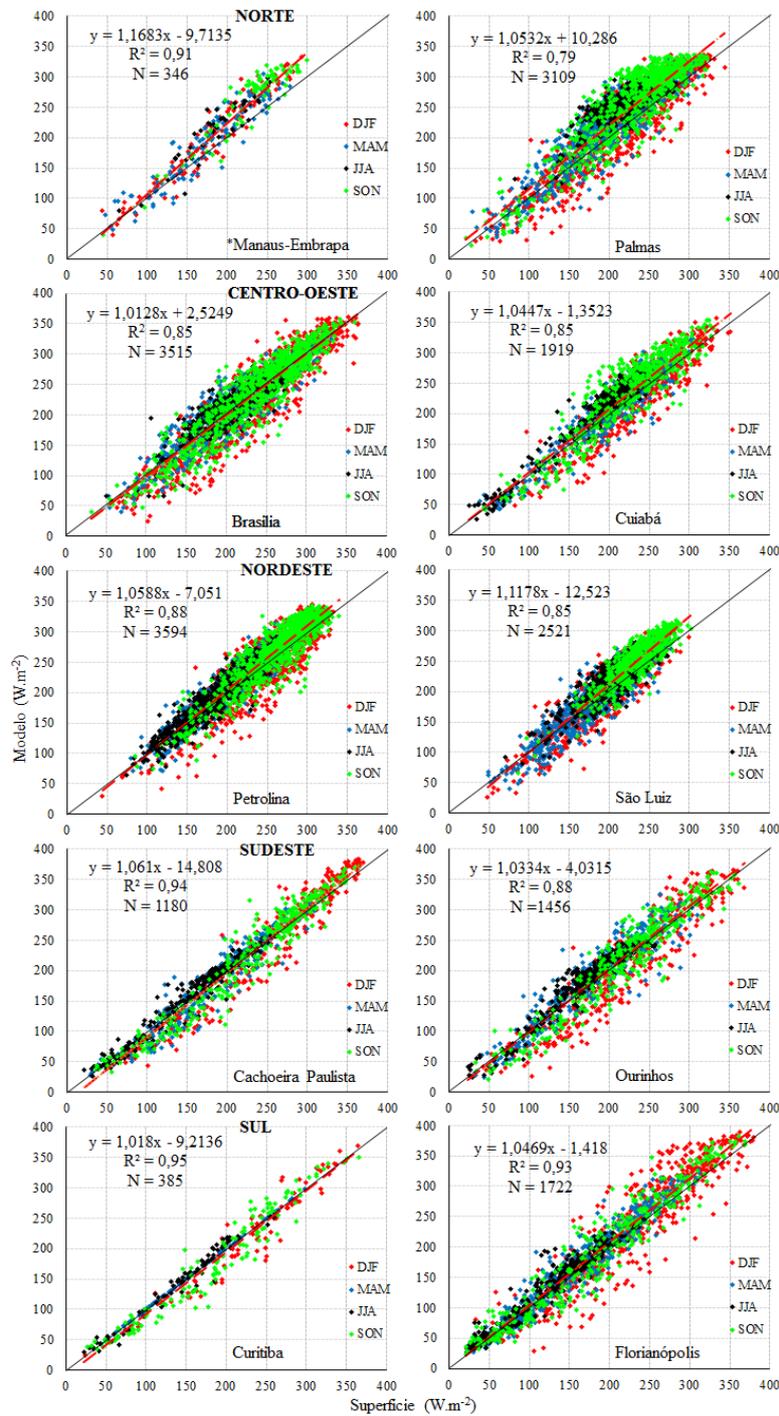
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.8 - Histogramas do desvio entre a irradiância solar diária estimada pelo modelo GL e a medida obtida por algumas estações analisadas das redes SolRad-Net e SONDA para cada região do Brasil. A curva tracejada indica a frequência acumulada da amostra utilizada na comparação. Ver os resultados de histogramas das outras estações no Apêndice Figura A.1.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 - Diagramas de dispersão entre os valores de irradiância solar diária observados e modelados em 10 estações das redes SolRad-Net e SONDA para cada região do país. A reta tracejada indica a linha de tendência. Ver os resultados de dispersão das outras estações no Apêndice Figura A.1.



Fonte: Produção do autor.

4.2.2. Análise na escala mensal

No que diz respeito aos resultados estatísticos de comparação da irradiância solar mensal do modelo GL1.2 e das observações, a Figura 4.10 ilustra os valores das métricas MBE, MAE e RMSE. A Figura 4.11 mostra as medidas do coeficiente de determinação entre a irradiância solar média calculada pelo GL1.2 e as medidas à superfície. Assim como na análise em escala diária, a estação Rolim de Moura não teve resultado estimado devido a falta de dados disponíveis, portanto, esta estação não será considerada para o cálculo da escala mensal. Desta maneira, contemplando 25 estações, os resultados de MBE, MAE e RMSE mensais ficam caracterizados como 8,7, 16,1 e 19,2 W.m^{-2} respectivamente. Em relação ao coeficiente de determinação médio mensal nestas estações o resultado obtido é na ordem de 0,77.

Os valores médios de RMSE e R^2 revelados por regiões foram: norte (25,7 W.m^{-2} , 0,69), centro-oeste (18,8 W.m^{-2} , 0,64), nordeste (16,1 W.m^{-2} , 0,79), sudeste (11,8 W.m^{-2} , 0,89) e sul (15,5 W.m^{-2} , 0,92). Conforme mencionado anteriormente, a região norte possui superestimação no resultado devido a refletância mínima assumida. Os resultados regionais mensais demonstram RMSE menores se comparados com os diários, e com valores abaixo de 20 W.m^{-2} nas regiões centro-oeste, nordeste, sudeste e sul. As regiões sudeste e sul possuem coeficientes próximo e acima de 0,90 respectivamente, confirmando uma ótima correlação dos dados comparados.

Os valores de RMSE mensal nas estações variaram entre 8,6 W.m^{-2} em Curitiba e 30,3 W.m^{-2} em Belterra. A região norte possui os resultados mais elevados se comparado com as outras regiões, ultrapassando o limiar de 20,0 W.m^{-2} em todas as estações avaliadas.

Analisando o coeficiente de determinação, o maior resultado encontrado é nas estações de Manaus-Embrapa, Chapecó e Curitiba (0,98) e os menores de 0,34 na estação Abracos Hill, 0,46 de Alta Floresta, 0,52 de Palmas, 0,53 de Rio Branco e Cuiabá-Miranda e 0,59 de Caicó, todas abaixo de 0,60. Nestas estações, 18 delas possuem

valores de R^2 superiores a 0,70 e a região sul apresenta a menor incerteza nas estimativas.

Na escala mensal, as estações de Balbina, Belterra, Manaus, Manaus-Embrapa e Palmas, da região norte, tiveram valores de MBE acima de 20 W.m^{-2} , isto é, 20% das estações observadas. Resultados de subestimativas foram apontados nas estações Cachoeira Paulista, Chapecó, Curitiba e São Martinho da Serra.

Para o MAE, as estações de Abraco Hill ($19,1 \text{ W.m}^{-2}$), Balbina ($25,3 \text{ W.m}^{-2}$), Belterra ($24,1 \text{ W.m}^{-2}$), Ji Paraná ($20,2 \text{ W.m}^{-2}$), Manaus ($20,8 \text{ W.m}^{-2}$), Manaus-Embrapa ($23,0 \text{ W.m}^{-2}$), Palmas ($25,5 \text{ W.m}^{-2}$), Rio Branco ($19,1 \text{ W.m}^{-2}$), Alta Floresta ($21,6 \text{ W.m}^{-2}$), Cuiabá-Miranda ($19,0 \text{ W.m}^{-2}$), Caicó ($16,6 \text{ W.m}^{-2}$), Chapecó ($16,9 \text{ W.m}^{-2}$) e Joinville ($20,5 \text{ W.m}^{-2}$) obtiveram valores superior a $16,1 \text{ W.m}^{-2}$, que é o valor médio das estações utilizadas.

No que se refere aos diagramas de dispersão dos valores mensais de irradiância média estimados pelo modelo GL e medidos a Figura 4.12 mostra distribuições bastante próximas da reta diagonal, ou seja, com menores incertezas nas estimativas. A região norte apresenta o maior espalhamento dos pontos deslocados da diagonal com as retas de tendência mais distante da reta diagonal central (1:1), que é a estimativa ideal, consequentemente indica uma superestimação nos resultados.

Os diagramas de dispersão contemplam o coeficiente de determinação, a equação da reta entre as variáveis analisadas e a quantidade de dados mensais utilizados.

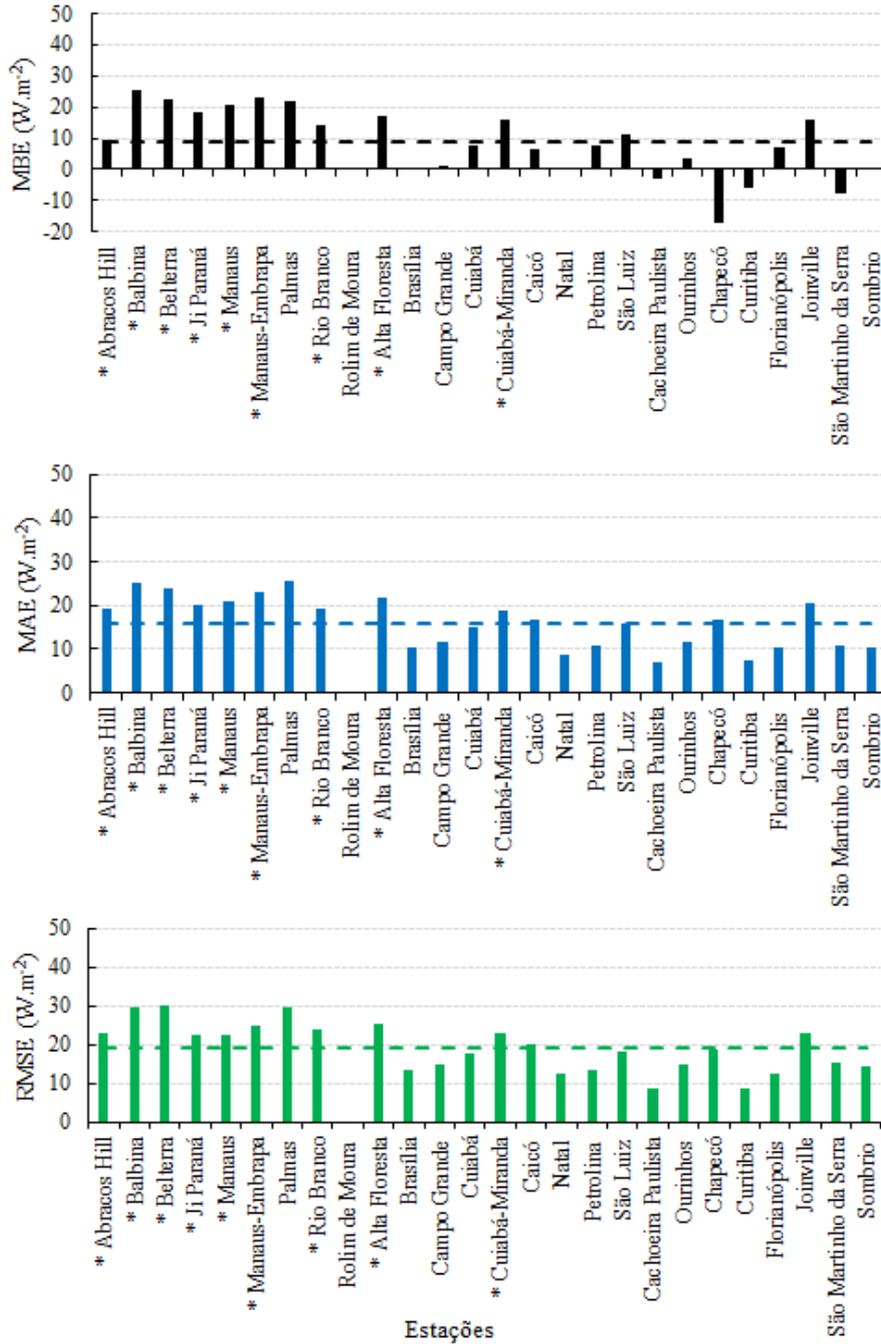
De modo geral, os exemplos com dados mensais também sugerem que o modelo retrata tendência média de superestimar a verdade terrestre.

A Figura 4.13 retrata comparações em escala mensal entre a irradiância média mensal medida e a estimada pelo GL, nas regiões do território brasileiro, ou seja, considera que os resultados obtidos atenderam todos os filtros aplicados no controle de qualidade apresentado na Seção 3.1.5. Pode-se observar no geral que o modelo tende a

superestimar a verdade terrestre, contudo de maneira mais caracterizada nas regiões norte, centro-oeste e nordeste. Analisando a quantidade de dados relacionados nestes gráficos, é possível notar as seguintes quantidades de meses nas estações apresentadas: norte, 12, centro-oeste, 123, nordeste, 123, sudeste, 39 e sul, 13. Nos Apêndices Tabela A.4 e Tabela A.5 é possível encontrar o detalhamento da quantidade de dados diários e mensais, respectivamente, de todas as 26 estações estudadas, conforme dito anteriormente. A Figura 4.13 ainda exemplifica que existe uma grande lacuna de dados faltantes nas estações radiométricas.

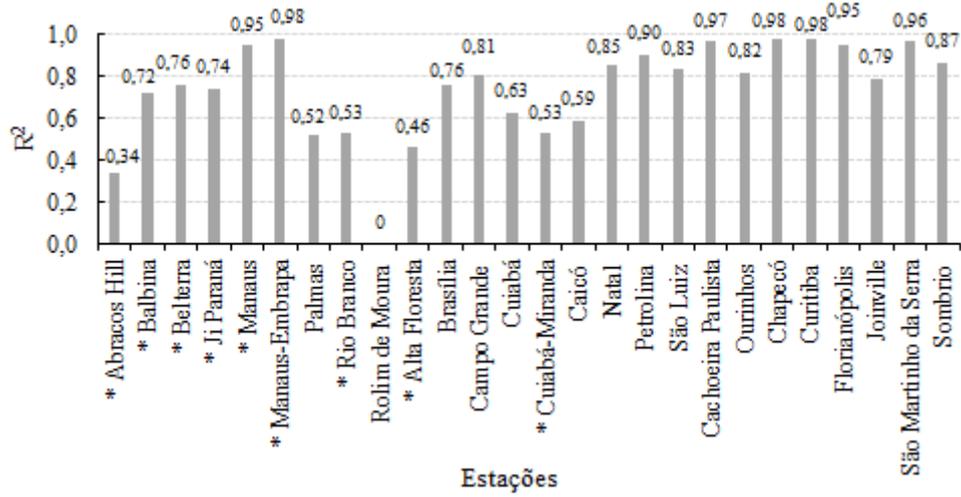
Na sequência, a Figura 4.14 demonstra alguns exemplos da diferença e da média da irradiância média mensal, em que é possível perceber a amplitude dos erros entre o valor de superfície e o do modelo. Norte, centro-oeste e nordeste demonstram valores médios positivos de 23,0, 0,6 e 7,5 W.m^{-2} , enquanto que sudeste e sul valores negativos de -2,9 e -6,1 W.m^{-2} . Destes dados avaliados, nota-se que a variação no sudeste e sul esteve entre -10,0 e 20,0 W.m^{-2} e no centro-oeste uma média mais próxima de zero. Enquanto isso, o norte, centro-oeste e nordeste obtiveram uma certa linearidade ao longo do tempo, apesar de haver alguns picos acentuados de desvios sejam acima ou abaixo da média.

Figura 4.10 - Valores de MBE, MAE e RMSE da análise dos dados do GL com dados mensais nas estações de superfície. A linha em tracejado indica o valor médio de todas as estações. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.



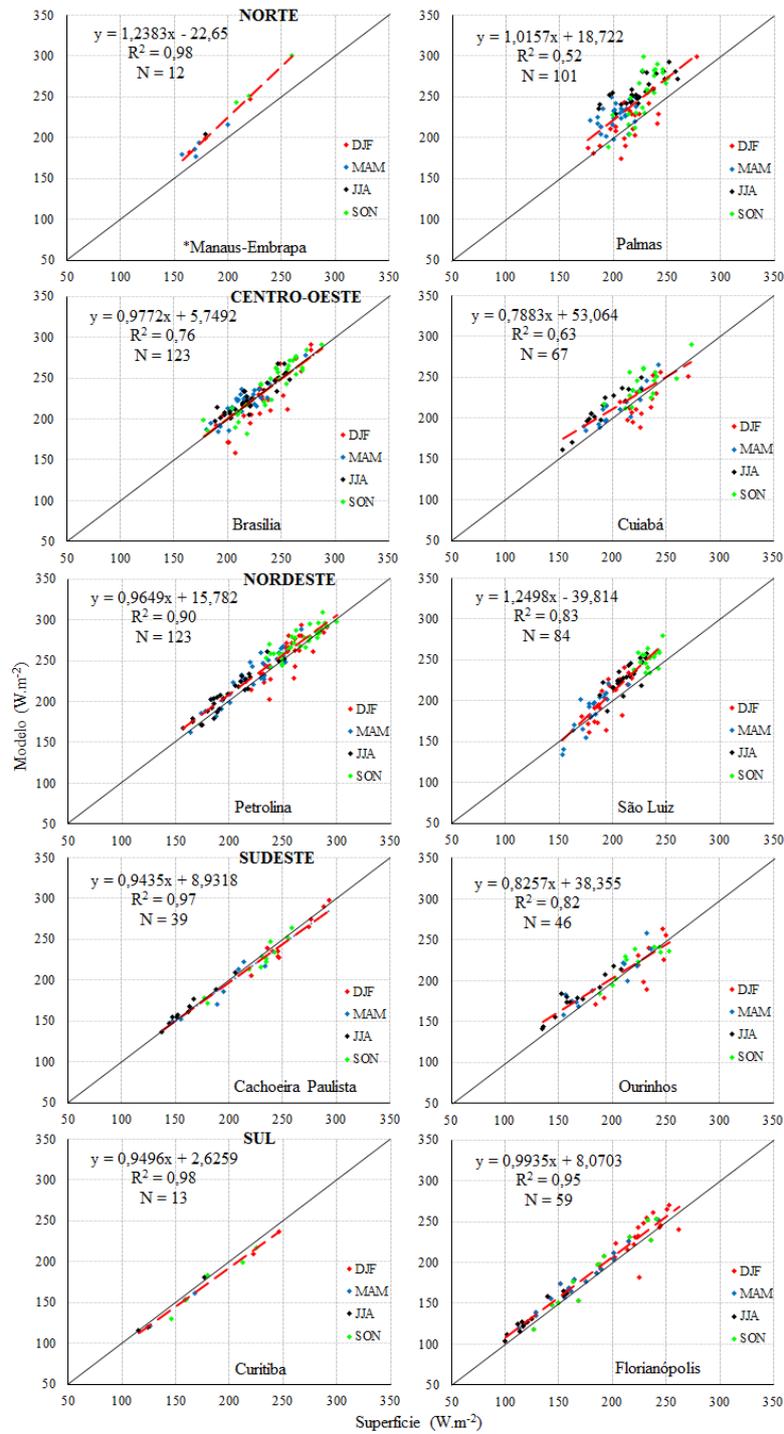
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.11 - Estatísticas dos coeficientes de determinação usando dados mensais. Ver tabela completa de dados no Apêndice Tabela A.7.



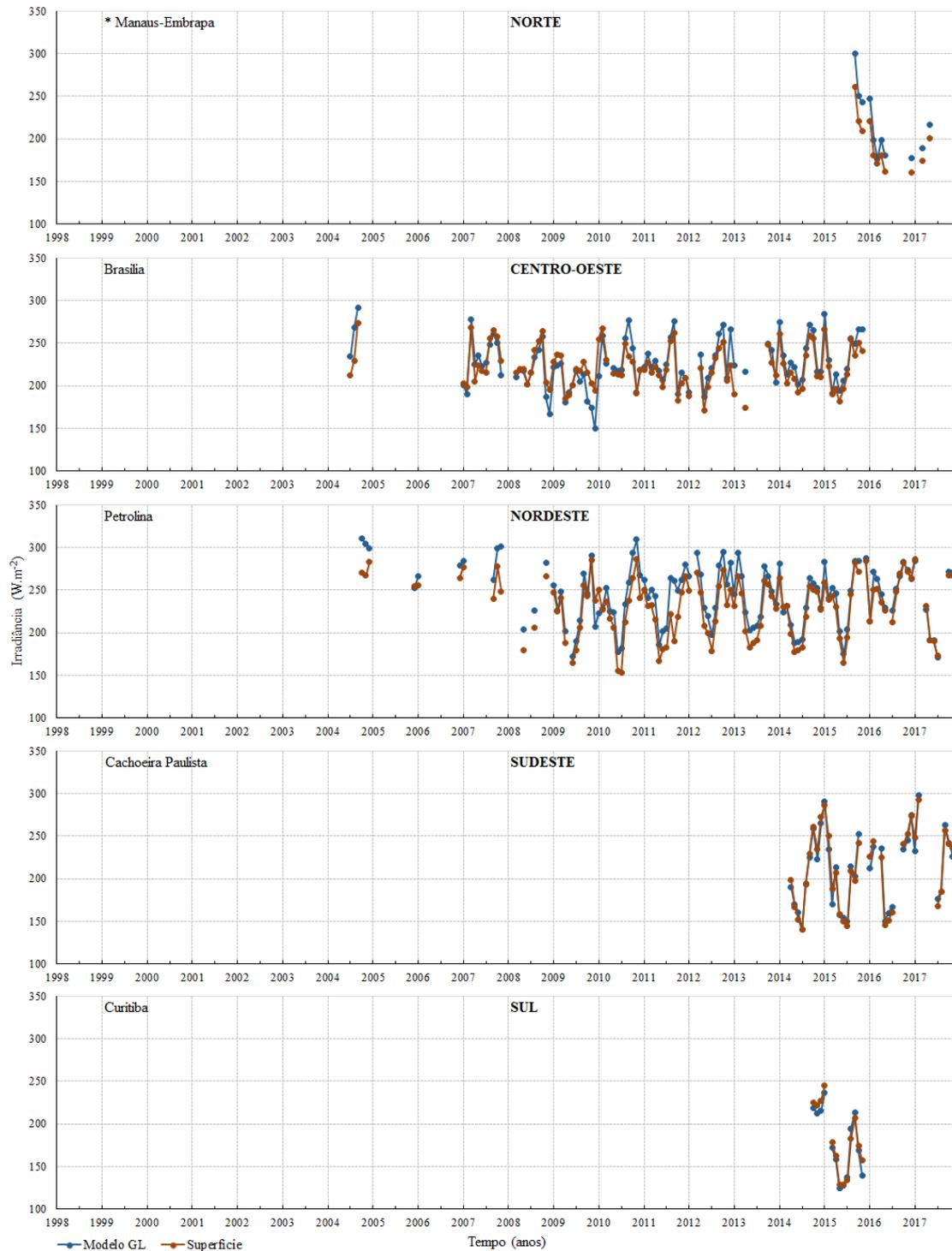
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.12 - Diagramas de dispersão entre os valores de irradiância solar média mensal observados e modelados em 10 estações das redes SolRad-Net e SONDA para cada região do país. Ver os resultados de dispersão das outras estações no Apêndice Figura A.2.



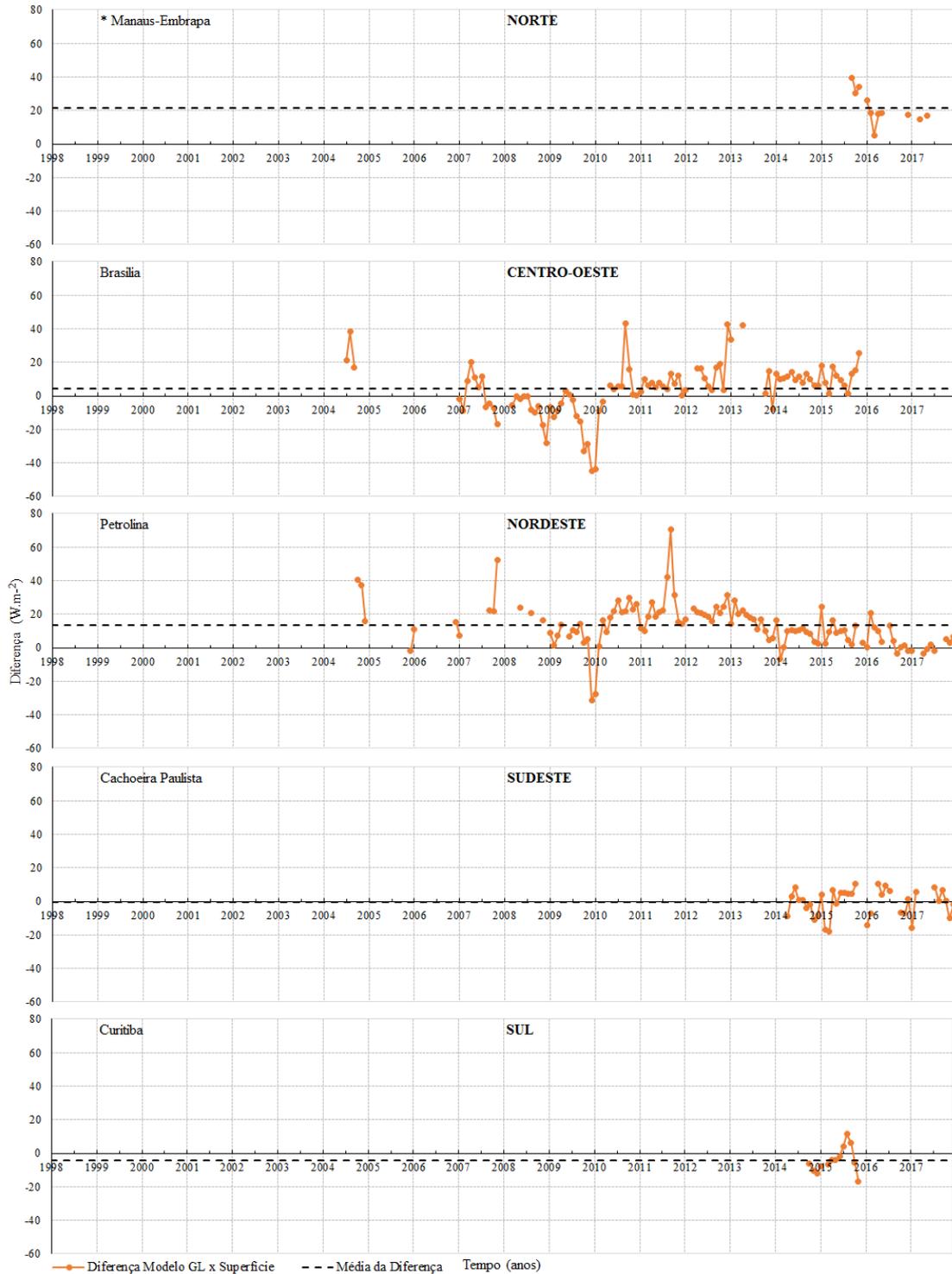
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.13 - Comparação temporal da irradiância média mensal (com dados diários) entre a estimativa do modelo GL e a medida à superfície. Ver as comparações das outras estações no Apêndice Figura A.3.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.14 - Série temporal da diferença da irradiância média mensal do modelo GL e o valor obtido em superfície. Linha tracejada indica a média da diferença. Ver as séries temporais das outras estações no Apêndice Figura A.3.



Fonte: Produção do autor.

4.2.3. Análise comparativa dos resultados da avaliação

No intuito de melhor avaliar os resultados obtidos nas Seções 4.2.1 e 4.2.2 foram realizadas comparações com informações estatísticas de alguns trabalhos publicados na literatura sobre o desempenho do GL e apresentados por outros autores. Assim, a Tabela 4.1 mostra o cenário com valores de MBE e RMSE encontrados na literatura e os alcançados no presente estudo. A princípio, vale destacar que os autores referenciados adotaram metodologia de filtragem distintas para o diagnóstico, redes ou regiões dissemelhantes, bem como dados em períodos diferenciados. Pode-se observar que os resultados encontrados possuem no geral uma boa concordância tanto para escala diária quanto na mensal, ou seja, não apresentam divergências relevantes. Importante mencionar que este trabalho contemplou todos os dados disponíveis nas redes SONDA e SolRad-Net num período de 20 anos de dados.

Tabela 4.1 - MBE e RMSE obtidos em estudos anteriores de estimativas da irradiância solar e do atual estudo no contexto de avaliação do GL.

Referência - escala	MBE ($W.m^{-2}$)	RMSE ($W.m^{-2}$)
Ortega et al. (2008) - mensal	inferior a 10	inferior a 20
Ceballos et al. (2011) - diária	entre 2 e 4	entre 20 e 35
Porfirio e Ceballos (2014) - diária	6,1	-
Britto et al. (2016) - mensal	entre -7 e 27	entre 16 e 32
Presente trabalho	<u>Escala diária</u>	<u>Escala diária</u>
	média de 8,4	média de 28,3
	entre -17,5 e 23,7	entre 19,7 e 39,3
	média de 4,3%	média de 14,1%
	<u>Escala mensal</u>	<u>Escala mensal</u>
	média de 8,7	média de 19,2
entre -16,9 e 25,2	entre 8,6 e 30,3	
	média de 4,4%	média de 9,6%

A Tabela 4.2 apresenta de forma resumida as métricas de validação para as médias mensais dos totais diários de irradiância com os valores de R^2 , MBE, RMSE e SDD do atual trabalho e os do Atlas Brasileiro de Energia Solar publicado em 2017. Importante mencionar que diferente da metodologia do Atlas, o produto GL não contempla os ajustes estatísticos de correção de erros. É possível notar comportamento de superestimativa em ambos os trabalhos e coeficientes de determinação regional na faixa de 0,81 a 0,93 ($R^2 > 0,80$) no presente estudo, enquanto que Pereira et al. (2017) encontraram resultados entre 0,66 e 0,96. Por fim, os resultados de SDD médio obtidos são próximos na ordem de 12,1%, pelo modelo GL, e 9,8%, pelo modelo Brasil SR.

Tabela 4.2 - Valores de R^2 , MBE, RMSE e SDD de irradiância solar incidente à superfície para cada região brasileira.

Referência		R^2	MBE (%)	RMSE (%)	SDD (%)
Pereira et al. (2017)	Norte	0,66	0,6	9,7	-
	Centro-oeste	0,74	0,2	8,3	-
	Nordeste	0,76	0,5	8,3	-
	Sudeste	0,83	0,1	8,4	-
	Sul	0,96	-0,1	8,9	-
	Médio	0,79	0,2	8,2	9,8
Presente trabalho <u>escala diária</u>	Norte	0,81	9,5	17,0	14,0
	Centro-oeste	0,84	4,1	12,5	11,4
	Nordeste	0,81	2,3	10,6	10,0
	Sudeste	0,91	0,1	11,7	11,6
	Sul	0,93	0,2	15,0	13,6
	Médio	0,86	3,2	13,3	12,1

4.3. Análise de tendência, da magnitude de tendência e de t de Student

Os resultados das tendências pelo método MK, das magnitudes de tendência pelo Sen's slope e dos testes t de Student no período de 20 anos estudados foram calculados com dados do modelo GL1.2 e estão resumidos na Tabela 4.3.

De acordo com a metodologia, os valores positivos (negativos) do teste MK indicam tendências crescentes (decrecente) e a tendência da série é considerada significativa ao nível de 5% caso $|MK| > 1,96$ e de 10% para $|MK| > 1,64$.

Os resultados mostram que as estatísticas são dominadas por valores positivos em 24 das 26 localidades, e a maioria não é significativa ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$) em 21 estações e 10% ($p < 0,10$) em 15 estações. As regiões norte, centro-oeste e sudeste não apresentam tendências negativas nos dois níveis, ao passo que, nordeste e sudeste não apresentam tendência significativa no nível 5%. Ao nível de 5% a tendência decrescente foi obtida somente nas estações São Luiz e Joinville, enquanto que as significativas nas estações de Ji Paraná, Palmas, Brasília, Cuiabá e São Martinho da Serra. Assim, não é possível definir influência das características regionais nos resultados de tendência.

A mesma tabela mostra que a magnitude de uma tendência a partir da inclinação do teste Sen's slope aponta a existência de tendências de aumento em quase todas as estações, exceto em cinco: Manaus, Natal, São Luiz, São Martinho da Serra e Sombrio. Os resultados opostos com relação ao teste MK são nas estações de Manaus, Natal, Joinville, São Martinho da Serra e Sombrio, mas somente em São Martinho da Serra a tendência é significativa para MK tanto no intervalo de 5 quanto de 10% de significância. No entanto, a magnitude é de $(-0,21 \text{ W.m}^{-2})$, ou seja, bem próximo de zero, portanto pode-se inferir uma divergência não relevante para a análise e pontual da estação.

Com relação ao teste t de Student, este foi utilizado para comparar as médias de dois grupos dentro da série, ou seja, utilização de dados anuais dos 20 anos para comparação

dos grupos dos 10 primeiros e 10 últimos anos. Baseado nisso, foi utilizado graus de liberdade = 18 (por utilizar dois grupos de dados) e $t_{\text{crítico } 18} = 2,101$ (1,734) para um nível de significância de 5% (10%). A Tabela 4.3 apresenta os resultados estatísticos do teste e pode-se observar que em quase todas as estações não há diferença significativa entre as médias, exceto na estação Joinville. Além disso, o valor apresentado encontra-se bastante próximo do $t_{\text{crítico}}$ nos níveis de confiança de 90 e 95% e teria negativa de diferença significativa para uma significância menor que 3% de $t_{\text{crítico}} = 2,356$, devido ao nível de confiança ser maior. Um outro ponto de atenção considerável é que esta estação apresenta tendência não significativa com a aplicação do método de MK.

Tabela 4.3 - Estatísticas dos testes de tendência MK, Sen's slope e t de Student para estimativas da radiação com dados do GL1.2 nas estações e respectivas regiões do Brasil. Considerando que: NS – Não Significativo, S – Significativo, NHDS – Não há diferença significativa entre as médias e HDS – Há diferença significativa entre as médias.

Estação	Estado	MK	Tendência		Sen's slope (W.m ⁻²)	T-student	Nível de Confiança		
			Nível de Confiança				95%	90%	
			95%	90%					
Norte	* Abracos Hill	RO	1,91	+ NS	+ S	2,56	-0,06	NHDS	NHDS
	* Balbina	AM	1,85	+ NS	+ S	1,47	-0,57	NHDS	NHDS
	* Belterra	PA	1,65	+ NS	+ S	1,43	0,12	NHDS	NHDS
	* Ji Paraná	RO	2,37	+ S	+ S	2,28	-0,11	NHDS	NHDS
	* Manaus	AM	1,40	+ NS	+ NS	-0,07	-0,20	NHDS	NHDS
	* Manaus-Embrapa	AM	1,52	+ NS	+ NS	1,98	-0,17	NHDS	NHDS
	Palmas	TO	2,30	+ S	+ S	4,05	-1,18	NHDS	NHDS
	* Rio Branco	AC	1,72	+ NS	+ S	2,22	0,05	NHDS	NHDS
	Rolim de Moura	RO	1,40	+ NS	+ NS	2,77	0,48	NHDS	NHDS
Centro-Oeste	* Alta Floresta	MT	1,91	+ NS	+ S	0,80	-0,12	NHDS	NHDS
	Brasília	DF	2,82	+ S	+ S	1,01	-0,99	NHDS	NHDS
	Campo Grande	MS	1,59	+ NS	+ NS	0,61	-0,63	NHDS	NHDS
	Cuiabá	MT	2,17	+ S	+ S	2,98	-0,49	NHDS	NHDS
	* Cuiabá-Miranda	MT	1,07	+ NS	+ NS	3,05	0,06	NHDS	NHDS
Nordeste	Caicó	RN	1,07	+ NS	+ NS	0,83	0,05	NHDS	NHDS
	Natal	RN	0,75	+ NS	+ NS	-1,87	0,48	NHDS	NHDS
	Petrolina	PE	1,46	+ NS	+ NS	0,11	-0,65	NHDS	NHDS
	São Luiz	MA	-0,16	- NS	- NS	-1,65	1,11	NHDS	NHDS
Sudeste	Cachoeira Paulista	SP	1,85	+ NS	+ S	0,10	-0,45	NHDS	NHDS
	Ourinhos	SP	1,20	+ NS	+ NS	2,29	0,53	NHDS	NHDS
Sul	Chapecó	SC	1,40	+ NS	+ NS	1,56	-0,04	NHDS	NHDS
	Curitiba	PR	0,88	+ NS	+ NS	6,20	1,06	NHDS	NHDS
	Florianópolis	SC	0,68	+ NS	+ NS	2,50	0,52	NHDS	NHDS
	Joinville	SC	-0,49	- NS	- NS	1,86	2,31	HDS	HDS
	São Martinho da Serra	RS	2,11	+ S	+ S	-0,21	-1,41	NHDS	NHDS
	Sombrio	SC	1,07	+ NS	+ NS	-0,60	-0,04	NHDS	NHDS

4.4. Análise de homogeneidade

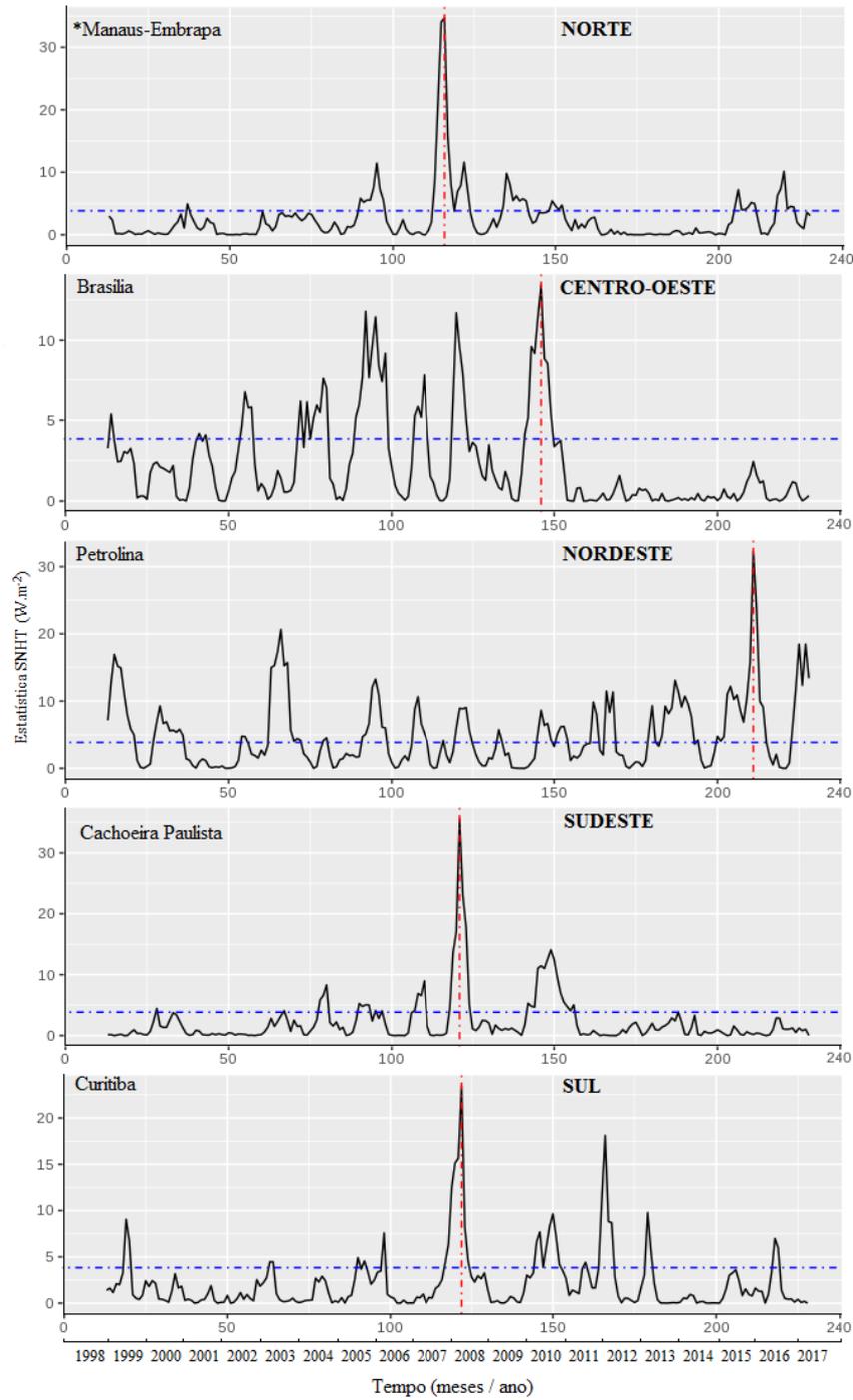
Esta seção compreende a realização da análise da homogeneidade da série histórica de 20 anos de dados de irradiância média mensal por meio da aplicação do teste SNHT. A

estrutura básica do teste consiste em detectar mudanças abruptas da série de dados climáticos, denominadas quebras.

O teste foi aplicado a cada uma das séries individuais das 26 estações e todas apresentaram registros de heterogeneidade ao longo do tempo. A Figura 4.15 representa o gráfico ilustrativo do resultado da estatística do teste SNHT, em nível de confiança de 95%, com um exemplo de estação para cada uma das 5 regiões do Brasil. É possível notar que além dos picos máximos, existem registros de picos de menor magnitude, e com base nisso, sugere-se que nas estações representadas na região norte, centro-oeste, sudeste e sul podem ser consideradas homogêneas a partir do primeiro semestre de 2012 (mês sequencial depois de 169), com quebras sutis no primeiro e último. A estação exemplificada e localizada na região nordeste é a que apresentou maior incidência de picos e observa-se diversas variações. Os gráficos que demonstram as regiões norte e sudeste são os que melhor representam dois amplos períodos de homogeneidade dos dados.

A Figura 4.16 mostra os resultados dos 3 ou 4 maiores picos de todas as estações durante o período de 20 anos, sendo no total mapeados 90 pontos. De todas as localidades as estações Balbina, Palmas, Petrolina, Florianópolis e Sombrio apresentaram algumas quebras isoladas nas extremidades, início e fim dos 20 anos, distantes de períodos de transição de satélites, isto é, não relacionadas com o desgaste ou falta de calibração de instrumentos ou pela mudança de sensibilidade do instrumento devido a substituição dos satélites. A forte incidência entre 2005 e 2006 para as estações das regiões norte, centro-oeste e nordeste, as indicações entre 2008 e 2009 e os sinais evidentes na região sul em 2011 apresentam características da sensibilidade do teste a fenômenos climáticos (períodos demarcados na Figura 4.16). Com relação aos períodos mencionados ocorreram forte seca, período chuvoso e influência de período com temperatura acima da média, respectivamente (MARENGO et al., 2016; MARENGO; ESPINOZA, 2016; MARENGO et al., 2011; TORRES et al., 2010; MARENGO et al., 2008).

Figura 4.15 - Resultados do estudo de simulação para demonstração do desempenho do teste SNHT. A linha vertical tracejada em vermelho representa a estatística máxima de SNHT computada nos dados. A linha horizontal em azul indica o limiar do nível de confiança para o teste. Ver os resultados do SNHT das outras estações no Apêndice Figura A.3.



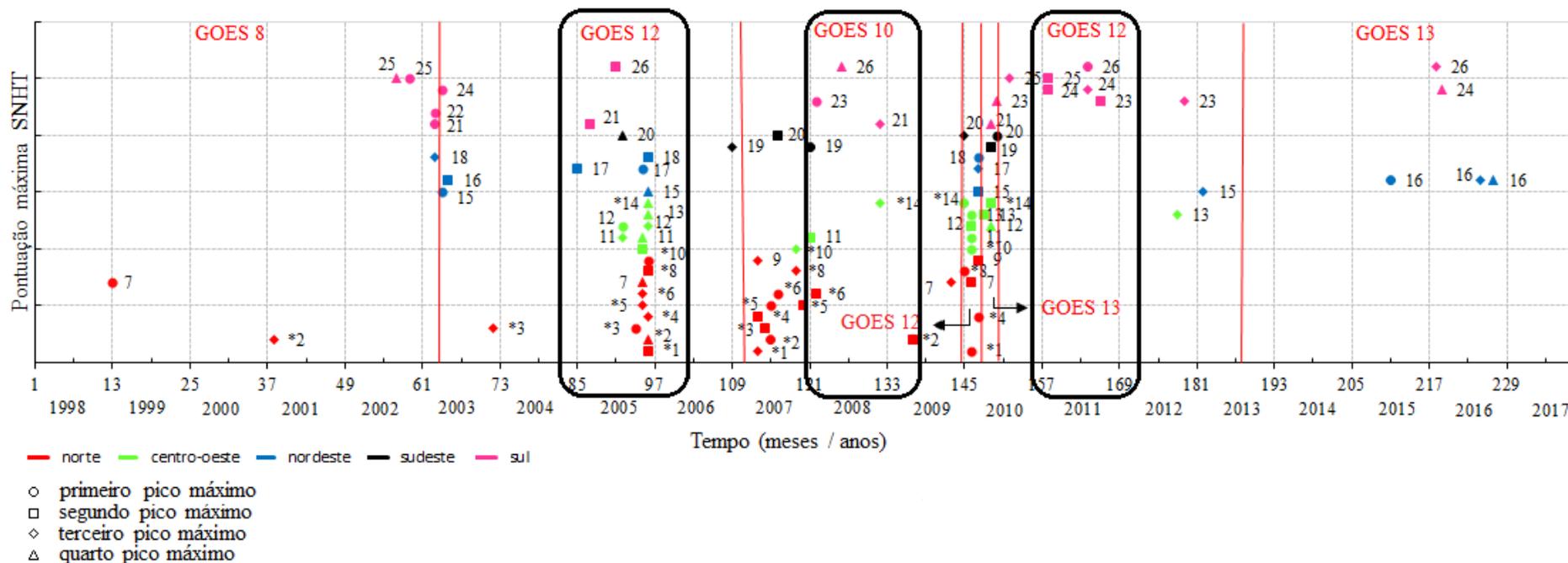
Fonte: Produção do autor.

Em resumo, considerando a proximidade dos registros apontados, podemos inferir por meio do SNHT que grande parte das estações, 53,3%, tiveram interferência relacionada a desgaste de sensores ou mudança de satélites e 38,9% a efeitos do clima e tempo. Portanto, a sensibilidade do teste pode ser influenciada por pequenas variações, seja deficiência de instrumentos ou por variações climáticas bruscas.

Em relação a análise do coeficiente de variação, foram verificadas as variações referente a diferença entre períodos de 6 meses de modo sequencial, em cada mês do ano, em relação aos resultados dos 20 anos.

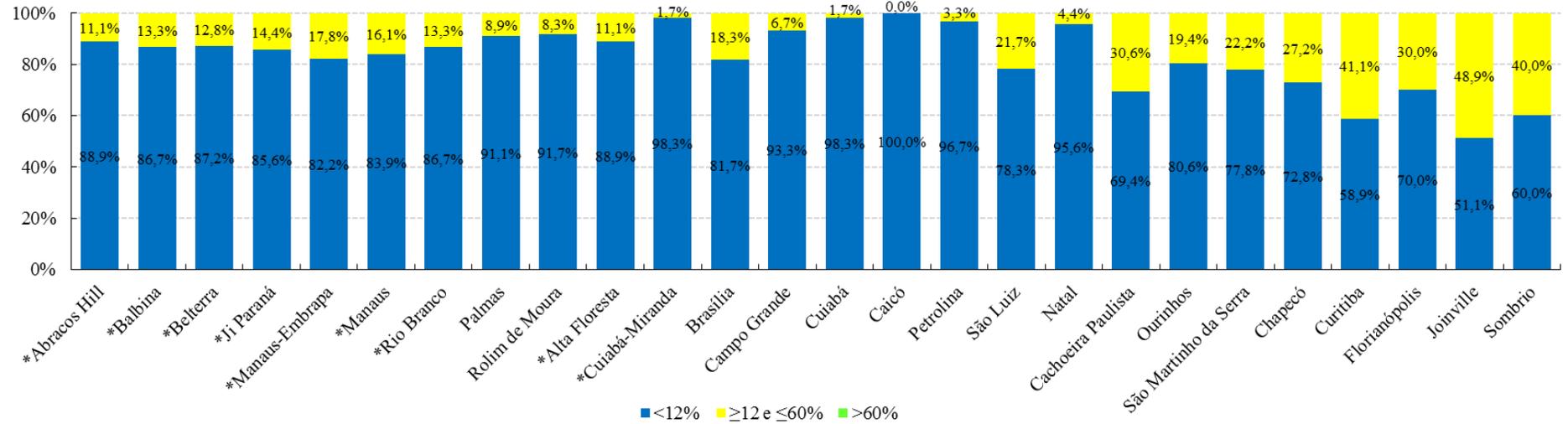
A Figura 4.17 mostra os resultados do coeficiente de variação apontando baixa, média ou alta variabilidade. O grau da variabilidade dos dados de irradiância média mensal indicam muito boa estabilidade temporal com 82,9% das medidas realizadas do coeficiente em baixa variabilidade, $CV < 12\%$, e 17,1% considerada variabilidade média, ou seja, na faixa de $(12\% \leq CV \leq 60\%)$ da variável em estudo. Este resultado considerou as 26 estações estudadas, e aquelas com mais elevados CV são as situadas na região sudeste e sul. Além disso, os coeficientes mais altos encontrados nas medições não ultrapassam 26%.

Figura 4.16 - Localização temporal dos mais elevados picos de não homogeneidade nas estações no período de 20 anos, por meio do SNHT. As barras em vermelho indicam época de mudança de satélites e os retângulos em preto períodos associados a fenômenos climáticos.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.17 - Percentual do coeficiente de variação em cada uma das estações.



Fonte: Produção do autor.

4.5. Avaliação da série histórica

Nesta seção é apresentada uma breve descrição da variabilidade interanual da série. Características climáticas de cada região influenciam o nível de radiação solar que atinge a superfície. A Figura 4.18 representa a composição dos dados de irradiância média mensal ao longo dos 20 anos para uma estação localizada em cada região geográfica do país. É possível notar nitidamente a maior variabilidade nas regiões sudeste e sul, e a diferença no ciclo de sazonalidade do verão-inverno entre as regiões norte, centro-oeste e nordeste se comparadas com as sudeste e sul. Outro fato interessante é a possibilidade de representar a série completa a partir de dados de modelagem, oposto aos dados de superfície, o qual apresenta escassez temporal de dados disponíveis (exemplo Figura 4.13). A Figura 4.18 difere da Figura 4.13 com relação a média mensal, pois a primeira foi contruída utilizando todo o conjunto de dados diários disponíveis e filtrados do modelo GL (somente Filtro 3), enquanto que na Figura 4.13, a média do GL é copilada utilizando dados diários em que haviam dados observados, após atender todos os filtros aplicados no controle de qualidade da Seção 3.1.5. A média mensal climatológica local da radiação depende da qualidade e quantidade de dados disponíveis para a construção da amostra mensal. No caso dos dados do GL, essa representação tem um peso maior na qualidade, uma vez que a série apresenta poucos dados faltantes. Exemplificando, para o mês de janeiro do ano de 2016 na estação Manaus-Embrapa (mês sequencial 217 da série), verifica-se que a média mensal do GL utilizando todos os dados disponíveis é de $227,3 \text{ W.m}^{-2}$ (Figura 4.18), ao passo que a média mensal considerando todos os filtros aplicados (Figura 4.13) do GL é na ordem de $246,9 \text{ W.m}^{-2}$ e para as observações de $220,5 \text{ W.m}^{-2}$.

A Figura 4.19 apresenta anomalias anuais padronizadas de todas as estações estudadas (Figura 4.19 a), por região geográfica (Figura 4.19 b) e uma média das 26 estações (Figura 4.19 c), com resultados variando entre -2,46 e 1,46 desvio padrão.

Observa-se anomalias padronizadas negativas nos períodos de 1998-2002 e 2006-2010, e positivas nos anos 2003-2005 e 2011-2017. Dois aspectos são importantes de serem observados. O primeiro, verifica-se que praticamente todas as regiões possuem

comportamentos similares em termos do sinal da anomalia. Segundo, uma inversão no sinal da anomalia, coincidindo com as janelas de observações de cada um dos satélites: anomalia negativa de 1998-2002 (GOES-8), anomalia positiva de 2003-2005 (GOES-12), anomalia negativa de 2007-2009 (GOES-10) e anomalia positiva de 2011-2017 (GOES-12 e GOES-13). Considerando esses aspectos pode-se dizer que essas anomalias podem estar associadas a composição da série usando diferentes sensores em órbita. Uma das técnicas que poderia corrigir esse possível artefato técnico é a partir de aplicação de estatística de homogeneização, a qual tenderia suavizar essas oscilações. No entanto, a variabilidade climática interanual também pode explicar parte dos sinais encontrados de anomalia, e aqui são averiguadas. Como apresentado na Seção 3.4, a variabilidade interanual do clima na América do Sul está principalmente associada as influências remotas dos Oceanos Atlântico e Pacífico. O impacto desses fenômenos, geralmente descritos em termos das chuvas, também podem alterar a fração de nebulosidade e conseqüentemente na quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície. Sendo assim, buscou fazer um breve resumo das condições climáticas que caracterizavam o período da série histórica do GL. Conclusões são preliminares, pois apenas são avaliadas em termos de poucas estações, o que pode ser uma representação espacial não muito representativa em termos de climatologia. No entanto, esta avaliação climática pode fornecer informações para melhor interpretar possíveis variabilidades naturais e interanuais de radiação solar inferidas por satélite (Figura 4.19).

Durante o período da série de dados, ocorreram sete eventos de El Niño (Tabela 3.4), sendo dois de intensidade muito forte (1997-1998 e 2015-2016), dois moderados (2002-2003 e 2009-2010) e três fracos (2004-2005, 2006-2007 e 2014-2015). Para os eventos de intensidade muito forte, observa-se claramente a variabilidade espacial do impacto do evento nos níveis de radiação (Figuras 4.19 a e 4.19 b). Para estes períodos, verifica-se anomalias positivas de radiação nas regiões norte e centro-oeste, enquanto que anomalias negativas ocorrem na região sul. Isso se deve ao fato de que em eventos típicos de El Niño há uma supressão de movimentos ascendentes, e portanto, redução de nuvens, aumentando a quantidade de radiação solar à superfície nas regiões ao norte. Por outro lado, o evento favorece a maior convecção e nebulosidade no sul do país,

diminuindo os níveis de radiação solar. Para os demais eventos, não fica evidente o sinal invertido das regiões ao norte e sul do país.

Estudos mostram que os anos de 2005 e 2010 foram considerados anos de seca na região da Amazônia. O ano de 2005 estava associado ao dipolo do Atlântico Tropical, com impacto na parte leste da bacia Amazônica, enquanto que o ano de 2010 estava associada às teleconexões de ambos eventos de El Niño de intensidade moderada e do dipolo do Atlântico Norte, afetando toda a extensão da Amazônia (MARENGO et al., 2016; MARENGO et al., 2011; MARENGO et al., 2008). Esse sinal é evidente também nas anomalias positivas de radiação da Figura 4.19, em que o déficit de chuva poderia indicar baixa cobertura de nuvens e maior quantidade de radiação à superfície. Estudos ainda apontam que a região da Amazônia teve o ano de 2008-2009 com excesso de chuva (MARENGO; ESPINOZA, 2016; TORRES et al., 2010), e para estes ano, também observa-se anomalia negativa de radiação. De acordo com os boletins climáticos emitidos pelo INPE/CPTEC em 2009, os quais encontram-se disponíveis em <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico>, as condições atmosféricas desde outubro de 2008 a junho de 2009, favoreceram a produção de chuva intensa sobre grande parte da região Amazônica. Os principais eventos responsáveis pelas chuvas foram a configuração de um evento forte de La Niña no final de 2008, no Pacífico Equatorial, e águas anormalmente quentes do Oceano Atlântico Sul. Na sequência deste período houve ocorrência dos fenômenos de La Niña fraco 2008-2009 e de El Niño moderado 2009-2010.

Importante salientar que a Figura 4.16 delimita períodos associados a fenômenos climáticos que englobam registros do teste SNHT, os quais coincidem com os períodos citados anteriormente e estão representados na Figura 4.19 c.

E não somente a região nordeste é afetada pela seca, outros eventos de seca ocorreram no Brasil, como é o caso ocorrido na região sudeste em 2014 e 2015 cujo impacto está associado à mais grave crise hídrica enfrentada pela região Metropolitana de São Paulo (MARENGO; ALVES, 2015). O pico da curva em preto na Figura 4.19 b está

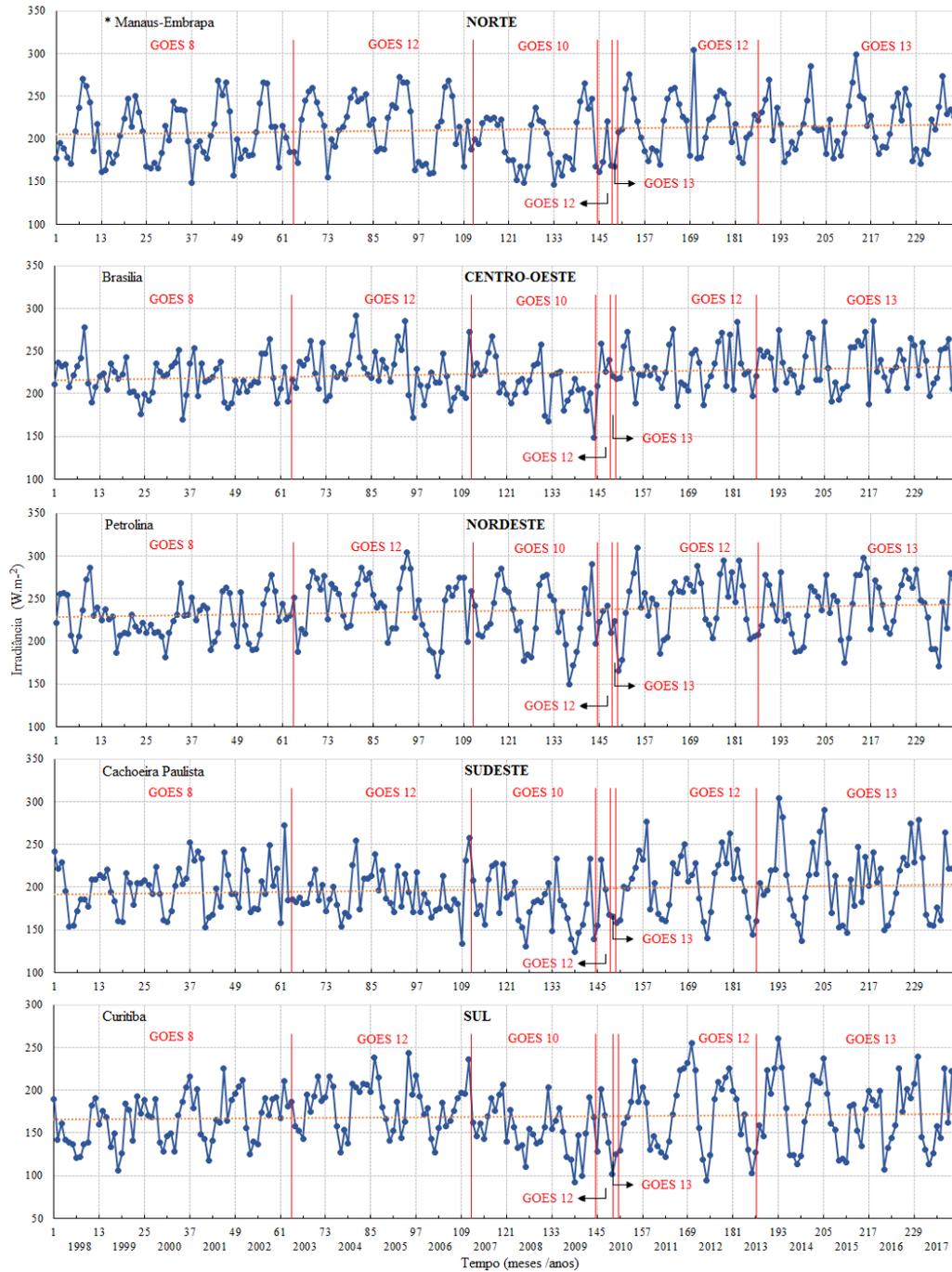
relacionada a uma das maiores secas da história registrada em 2014 na região sudeste do país.

Vale ressaltar, que o clima das regiões norte e oeste do Brasil ainda podem variar de acordo com padrões de anomalia da temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical Norte.

Enfim, a partir da Figura 4.19 representando anomalia padronizada, pode-se perceber que durante o período de 20 anos houve uma ligeira tendência de acréscimo, o que corrobora o resultado apresentado na Tabela 4.3 da Seção 4.3, que apontou tendência de $1,47 \text{ W.m}^{-2}$ na média de todas as estações.

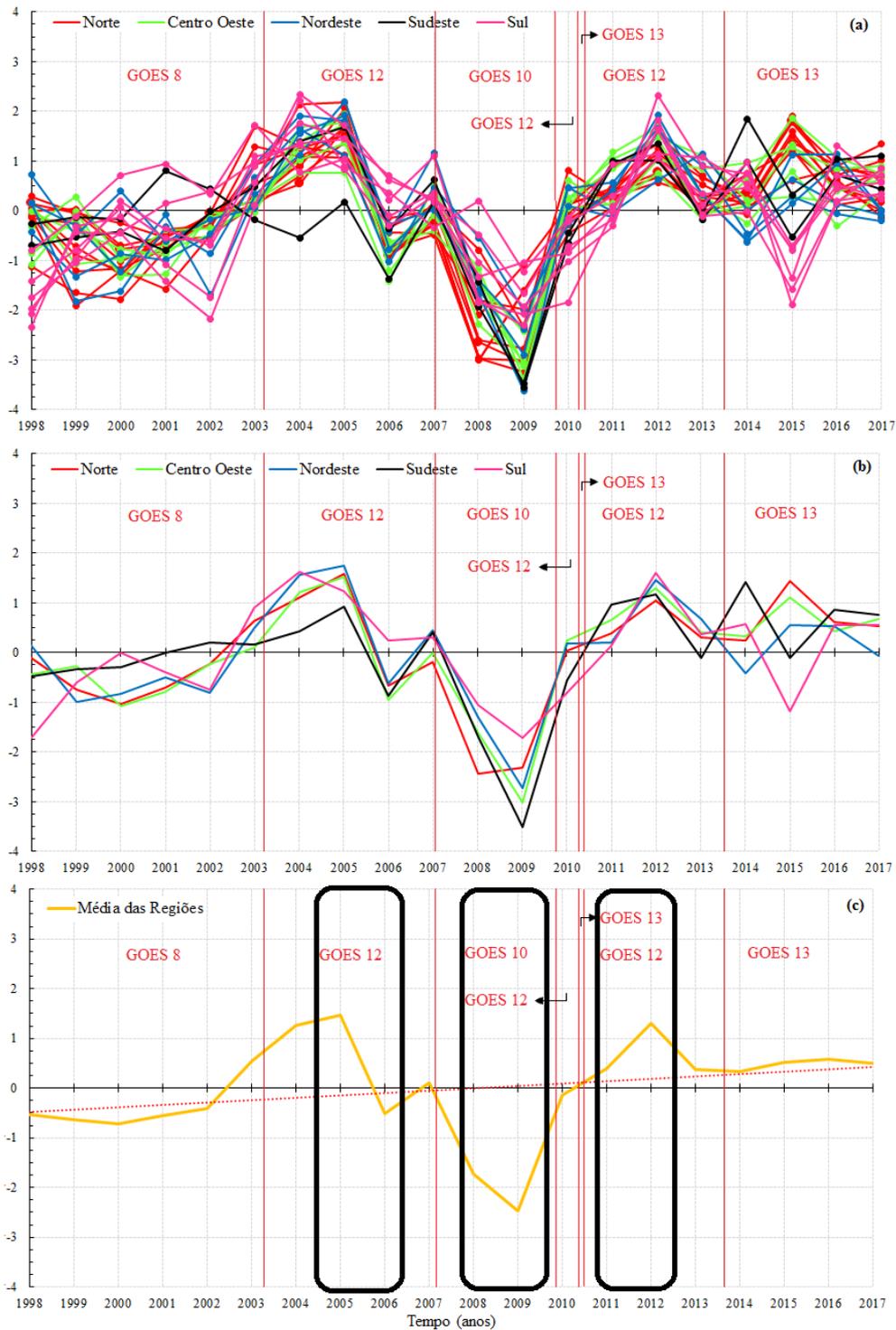
Apesar dos resultados indicarem que parte da oscilação dos níveis de radiação solar a superfície estimada por satélite também podem estar associadas à variabilidade climática, essas conclusões são ainda limitadas aos pontos estudados.

Figura 4.18 - Composição da base histórica do modelo GL1.2 com dados de irradiância média mensal a partir de dados diários no período entre 1998 e 2017. As barras em vermelho indicam época de mudança de satélites. Posição latitude-longitude da estação Cuiabá-Miranda. Ver as composições das outras estações no Apêndice Figura A.3.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.19 - Série da média anual do modelo GL expressa como anomalia em (DP) de 1998 a 2017. Anomalia sendo: (a) em todas as estações, (b) por regiões e (c) média de todas as regiões do Brasil. Os retângulos em preto representam períodos associados a fenômenos climáticos.



Fonte: Produção do autor.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi avaliado o comportamento dos dados de radiação solar inferidos por satélite GOES por meio do modelo GL1.2 em longa escala temporal durante o período de 1998 a 2017. Os testes foram realizados no ponto das estações, portanto as conclusões são limitadas para os locais analisados.

Para melhor explorar os dados, foi construída a série mensal de 20 anos dos dados de irradiância média, a partir de dados diários e complementada com dados mensais. Nas localizações das estações da rede de dados observacionais da SolRad-Net, fonte internacional de dados, e da rede SONDA, rede nacional de dados, foi possível realizar um levantamento estatístico dos dados diários e mensais, avaliações e testes com os dados de irradiância da composição da base histórica do modelo GL1.2.

Utilizando dados diários, a irradiância média em 20 anos foi de $211,5 \text{ W.m}^{-2}$ e DP de $69,1 \text{ W.m}^{-2}$, e para os resultados regionais, as mais expressivas representações de variabilidade são para as regiões sudeste e sul. Considerando todas as estações possíveis, o MBE ficou na ordem de $8,4 \text{ W.m}^{-2}$, o MAE de $22,4 \text{ W.m}^{-2}$ e o RMSE de $28,3 \text{ W.m}^{-2}$ e coeficiente de determinação médio de 0,85, sendo na região norte o resultado de RMSE mais acentuado. Os diagramas de dispersão entre valores diários de irradiância média estimados pelo modelo GL e medidos para cada uma das regiões brasileiras demonstram que o modelo apresenta tendência em superestimar a verdade terrestre (exceto um caso da região sul), e de forma mais pronunciada na região norte. Os histogramas dos desvios mostram que em torno de 80% das diferenças observadas nos dados diários é positiva na região norte e nordeste. As estações localizadas nas regiões sudeste e sul registram MBE mais próximos de zero, com frequência acumulada em cerca de 50%.

Os resultados de MBE, MAE e RMSE mensais ficaram caracterizados como 8,7, 16,1 e $19,2 \text{ W.m}^{-2}$ respectivamente. O coeficiente de determinação médio mensal obteve resultado de 0,77. Os diagramas de dispersão demonstram menores incertezas nas estimativas para as regiões sudeste e sul, e superestimação nos resultados na região

norte. De modo geral, os exemplos com dados mensais também sugerem que o modelo retrata tendência média de superestimar a verdade terrestre. Na comparação estimado x observado utilizando dados mensais, o modelo tende a superestimar a verdade terrestre, mas de maneira mais destacada nas regiões norte, centro-oeste e nordeste. Em alguns exemplos de média da diferença da irradiância média mensal, o norte, centro-oeste e nordeste demonstram valores médios positivos de 23,0, 0,6 e 7,5 $W.m^{-2}$, enquanto que sudeste e sul valores negativos de -2,9 e -6,1 $W.m^{-2}$. Destes dados avaliados, nota-se uma baixa amplitude de variação no sudeste e sul e uma média mais próxima de zero no centro-oeste.

Com o intuito de avaliar o cenário dos resultados com outros estudos da literatura, é possível observar uma boa concordância tanto para escala diária quanto na mensal. Além disso, nota-se também comportamento de superestimativa dos resultados pelo modelo GL e modelo Brasil SR (Pereira et al., 2017), obtendo neste trabalho resultados regionais de coeficientes de determinação na faixa de 0,81 a 0,93, MBE médio de 3,2%, RMSE médio de 13,3 e SDD médio de 12,1%.

Os resultados de tendência, que é outro propósito deste trabalho, mostram que as estatísticas são dominadas por valores positivos em 24 das 26 localidades, e não são significativas em 21 estações ao nível de significância de 5% e em 15 de 10%. Sen's slope aponta a existência de tendências de aumento em quase todas as estações, exceto em 5, mas somente em 1 a tendência é significativa para MK, seja no intervalo de 5 ou de 10% de significância. Entretanto, a magnitude é próxima de zero, caracterizando divergência pontual, então, não relevante para a análise da estação. No teste t de Student, pode-se observar que em praticamente todas as estações não há diferença significativa entre as médias para níveis de confiança de 90 e 95%, exceto em 1 estação (Joinville). Este valor apresentado encontra-se bastante próximo do t crítico e é uma estação que apresenta tendência não significativa com a aplicação do método de MK.

Com relação a um importante objetivo, a homogeneidade dos dados, foi aplicado o teste SNHT em nível de confiança de 95%. É possível notar que mesmo apresentando registros de picos de diferentes magnitudes, os resultados sugerem que as estações

representadas na região norte, centro-oeste, sudeste e sul possuem homogeneidade nos dados depois de 2012. As fortes incidências entre 2005 e 2006 para as estações das regiões norte, centro-oeste e nordeste, as indicações entre 2008 e 2009 e os sinais evidentes na região sul em 2011 apresentam características da sensibilidade do teste a fenômenos climáticos. Com relação aos períodos mencionados ocorreram respectivamente seca severa, período chuvoso e influência de período com temperatura acima da média. No primeiro semestre de 2003 e 2007, e entre final de 2009 e primeiro semestre de 2010 houve evidente influência de mudança de satélite pelos resultados do teste. Em resumo, podemos inferir por meio do SNHT que grande parte dos registros de pontos de máximo, 53,3%, tiveram interferência relacionada a desgaste de sensores ou transição de satélites e 38,9% a efeitos do clima e tempo.

O grau da variabilidade dos dados de irradiância média mensal indicam muito boa estabilidade temporal com 82,9% das medidas realizadas em baixa variabilidade, coeficiente de variação $CV < 12\%$, e 17,1% em variabilidade média, ou seja, $12\% \leq CV \leq 60\%$. Este resultado considerou as 26 estações estudadas, e aquelas com mais elevados CV são as situadas na região sudeste e sul, porém, os coeficientes mais altos encontrados nas medições não ultrapassam 26%.

Por fim, observa-se que a variabilidade interanual do estado climático da série influencia o nível de radiação solar que atinge a superfície e a anomalia anual padronizada varia entre -2,46 e 1,46 DP. Uma vantagem das estimativas do GL é a possibilidade de representar a série completa a partir de dados de modelagem, oposto aos dados de superfície, os quais apresentam escassez temporal de dados disponíveis. A variabilidade climática interanual também pode explicar parte dos sinais encontrados de anomalia devido ao impacto dos fenômenos ENOS. Estudos mostram que os anos de 2005 e 2010 foram considerados anos de seca na região da Amazônia, e que a mesma região teve o ano de 2008-2009 com excesso de chuva, enquanto que a região sudeste em 2014 e 2015 foi afetada pela seca. Vale ressaltar que os períodos associados a fenômenos climáticos pelo teste SNHT coincidem com os sinais apontados nos resultados de anomalia anual padronizada. É possível notar ainda que durante o período de 20 anos da anomalia houve uma ligeira tendência de acréscimo, o que também foi

observado nos resultados apresentados no teste de tendência ($1,47 \text{ W.m}^{-2}$ na média de todas as estações).

Diante do exposto, conclui-se que este trabalho apresenta uma contribuição relevante no entendimento do comportamento do modelo GL em um período de 20 anos de dados inferidos por satélite e que a série histórica (1998-2017) possui potencial elevado para realização de estudos de radiação solar.

5.1. Sugestões para futuros trabalhos

Para uma continuidade, propõe-se possíveis pontos para extensão deste trabalho:

- Realizar análise da série histórica em caráter de abrangência espacial na resolução do modelo;
- Melhor avaliar o estudo da variabilidade interanual por meio de uma análise espacial, e também utilizar outras variáveis que possam descrever a nebulosidade;
- Aplicar outros testes de tendência, por exemplo, a técnica de Análise de Tendência Inovadora utilizada por Zhou et al. (2018), que divide a série temporal em duas partes iguais e as compara em um sistema de coordenadas cartesianas;
- Realizar avaliação de tendência e homogeneidade usando estações do INMET;
- Analisar aspectos meteorológicos da série, com estudo climático mais aprofundado;
- Tendo em vista que nebulosidade é um fator importante para radiação à superfície, seria interessante entender e comparar os dados de cobertura de nuvens inferida com dados independentes de modelagem ou reanálise;
- Estudar a anomalia em outras regiões com mais detalhamento e diferentes características dentro da área de cobertura do satélite na América do Sul;
- Devido à disponibilidade de dados do CMSAF, NASA e NOAA na América do Sul, realizar uma intercomparação com dados destes produtos;

- Validar a performance de cada satélite usando uma rede mais extensa de dados;
- Investigar a estabilidade temporal utilizando outros métodos e níveis de variabilidade;
- Avaliar a proposta realizada utilizando a versão aprimorada do modelo GL na versão 2.0;
- Reprocessar os dados nos períodos de transição de satélites ou se for utilizar dados nestes períodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, E. et al. **Guidelines on climate metadata and homogenization**. Genebra: WMO, 2003. (World Climate Programme Data and Monitoring WCDMP, 53).

ALLAN, R. P. et al. Exploitation of geostationary Earth radiation budget data using simulations from a numerical weather prediction model: methodology and data validation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D14, 2005.

ALEXANDERSSON, H. A homogeneity test applied to precipitation data. **Journal of Climatology**, v. 6, n. 6, p. 661-675, 1986.

ALEXANDERSSON, H.; MOBERG, A. Homogenization of Swedish temperature data. Part I: homogeneity test for linear trends. **International Journal of Climatology**, v.17, n. 1, p. 25-34, 1997.

ANDREOLI, R. V. et al. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1374-1390, 2017.

BELWARD, A. **The global observing system for climate: implementation needs**. Genebra: WMO, 2016.

BENEDETTI, A. et al. Aerosol analysis and forecast in the European centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: 2. data assimilation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D13, 2009.

BEZERRA A. E.; DA SILVA, D. F. Global dimming: uma breve revisão relacionando o fenômeno com variáveis meteorológicas. In: ENCONTRO UNIVERSITÁRIO DA UFCA, 1., 2013, Juazeiro do Norte - CE. **Anais...** 2013.

BLANC, P. et al. The HelioClim project: surface solar irradiance data for climate applications. **Remote Sensing**, v. 3, n. 2, p. 343-361, 2011.

BOILLEY, A.; WALD, L. Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. **Renewable Energy**, v. 75, p. 135-143, 2015.

BOJINSKI, S. et al. The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 9, p. 1431-1443, 2014.

BRITTO, J.M.S.; PORFIRIO, A.C.S.; CEBALLOS J.C.; COSTA, S.M.S. Validação do modelo de radiação solar GL1.2 CPTEC com dados da rede automática do INMET - 1º semestre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 19., 2016, João Pessoa – PB. **Anais...** 2016.

BROWNING, J., SCHNEIDER, C. **Standard normal homogeneity test**. CRAN-R Package, 2017. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/snht/snht.pdf>.

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

CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J.; SOUZA, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, D02211, 2004. DOI:10.1029/2003JD003531.

CEBALLOS, J. C. et al. Radiación solar en la provincia de Tucumán: una comparación entre valores estimados por satélite y medidos por una red solarimétrica. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 15, p. 71-78, 2011.

CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L.; OLIVEIRA, L. M. **Desempenho do modelo GL versão 1.2 época: outubro 2010 - dezembro 2010**. Cachoeira Paulista: INPE, 2011. (Relatório Técnico 01/11-RST-DSA).

CEBALLOS, J.C.; MACEDO, L.O. Uma base de dados de radiação solar na América do Sul, estimada por satélite (modelo GL1.2/CPTEC). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5., 2014, Recife – PE. **Anais...** 2014.

CECONI, M. **Variabilidade do coeficiente de cobertura de nuvens sobre o Brasil e sua relação com os fenômenos de solar dimming e brightening**. 2013. 184f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 2013.

COELHO, C. A. S. et al. Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. **Meteorological Applications**, v. 19, n. 2, p. 237-255, 2012.

DARNELL, W. L. et al. Seasonal variation of surface radiation budget derived from International Satellite Cloud Climatology Project C1 data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 97, n. D14, p. 15741-15760, 1992.

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.

DE GOIS, G. et al. Models to estimate incident solar radiation on Seropédica, Rio de Janeiro. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 2, p.505-513, 2016.

ESPINOZA, J. C. et al. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): understanding the exceptional 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 13, L13406, 2011.

FU, Q.; LIOU, K. No. Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 50, n. 13, p. 2008-2025, 1993.

GEOSTATIONARY OPERATIONAL ENVIRONMENTAL SATELLITE (GOES). **GOES-R**. Disponível em: <<http://www.goes-r.gov/mission/history>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263-280, 2003.

GRIMM, A. M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2/3, p. 123-138, 2004.

GUPTA, S. K. et al. The Langley Parameterized Shortwave Algorithm (LPSA) for surface radiation budget studies. Washington: NASA, 2001. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020022720.pdf>.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Glossário de termos técnicos em radiação atmosférica** - versão 2.0. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Modelo GL**: séries temporais de radiação solar na América do Sul. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA)**. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 29 mar. 2019.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Charles Griffin, 1955. 196p.

KHALED, W. M.; EL AFANDI, G. Evaluation of NCEP/CFSR solar data against ground observation over MENA. **Open Journal of Atmospheric and Climate Change**, p. 1-12, 2014.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 1, p. 118-133, 1974.

LACIS, A. A.; OINAS, V. A description of the correlated k distribution method for modeling nongray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 96, n. D5, p. 9027-9063, 1991.

LOHMANN, S. et al. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. **Solar Energy**, v. 80, n. 11, p. 1390-1401, 2006.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, v.13, n.3, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2015.

MARENGO, J. A. et al. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011.

MARENGO, J. A. et al. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495-516, 2008.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. D. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário - o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.

MELO FILHO, J. F.; LIBARDI, P. L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.4, p.497-506, 2005.

MORCRETTE, J. J. et al. Aerosol analysis and forecast in the European Centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: forward modeling. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D6, 2009.

- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- MUELLER, R. W. et al. Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: the SOLIS clear-sky module. **Remote sensing of Environment**, v. 91, n. 2, p. 160-174, 2004.
- MUELLER, R. W. et al. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance - a LUT based eigenvector hybrid approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 1012-1024, 2009.
- NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. **Solar Radiation Network (SolRad-Net)**. Disponível em: <<https://solrad-net.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 29 mar.2019.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J.. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.
- OINAS, V. et al. Radiative cooling by stratospheric water vapor: big differences in GCM results. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 14, p. 2791-2794, 2001.
- OLIVEIRA, G. S. **O El Niño e você: o fenômeno climático**. São José dos Campos - SP: Transtec Editorial, 2001. v. 2000. 116p.
- ORTEGA, A. et al. Avaliação do recurso solar no Chile. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 18.; CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA A ISES, 3., 2008. Florianópolis – SC. **Anais...** 2008.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. v.1.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2017. v.2.
- PETTY, G. W. **A first course in atmospheric thermodynamics**. [S.l.]: Sundog Publishing, 2008.
- PFEIFROTH, U. et al. **Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH)** - Edition 2.1, satellite application facility on climate monitoring. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01.

- POHLERT, T. **Non-parametric trend tests and change-point detection**. 2016. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/vignettes/trend.pdf>.
- POSSELT, R. et al. Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring - the CM-SAF retrieval in international comparison. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p. 186-198, 2012.
- PINKER, R. T.; ZHANG, B.; DUTTON, E. G. Do satellites detect trends in surface solar radiation? **Science**, v. 308, n. 5723, p. 850-854, 2005.
- PORFIRIO, A.C.S.; CEBALLOS J.C. Uso do modelo GL na estimativa de radiação solar direta e difusa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 18., 2014. Recife – PE. **Anais...** 2014.
- PORFIRIO, A.C.S. **Uma contribuição à modelagem de aerossol e componentes da radiação solar no modelo GL**. 2017. 136f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 2017.
- PORFIRIO, A.C.S.; CEBALLOS, J.C.; BRITTO, J.M.S.; COSTA, S.M.S. Evaluation of global solar irradiance estimates from GL1.2 satellite-based model over Brazil using an extended radiometric network. **Remote Sensing**, 2019. Submetido.
- RAMANATHAN, V. et al. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. **Nature**, v. 448, n. 7153, p. 575, 2007.
- ROSÁRIO, N. M. 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**. 2011. 225f. Tese (Doutorado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, SP, 2011.
- ROSSOW, W. B.; ZHANG, Y. C. Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets: 2. validation and first results. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 100, n. D1, p. 1167-1197, 1995.
- RUTAN, D. A. et al. CERES synoptic product: methodology and validation of surface radiant flux. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 32, n. 6, p. 1121-1143, 2015.
- SALVADOR, M. M. S. et al. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da distribuição da armazenagem de água no solo numa sucessão feijão/aveia-preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1434-1447, 2012.

SANCHEZ-LORENZO, A.; WILD, M.; TRENTMANN, J. Validation and stability assessment of the monthly mean CM-SAF surface solar radiation dataset over Europe against a homogenized surface dataset (1983–2005). **Remote Sensing of Environment**, v. 134, p. 355-366, 2013.

SENA, E. et al. Reduced wet-season length detected by satellite retrievals of cloudiness over Brazilian Amazonia: a new methodology. **Journal of Climate**, v. 31, n. 24, p. 9941-9964, 2018.

SCHMIDT, G. A. et al. Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 6, n. 1, p. 141-184, 2014.

SILVA, R. A. et al. Estudo da variabilidade da radiação solar no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, p. 501-509, 2010.

STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; PASCHKE, E. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 29, n. 7, p. 586-603, 1990.

TORRES, O. et al. OMI and MODIS observations of the anomalous 2008–2009 Southern Hemisphere biomass burning seasons. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 8, p. 3505-3513, 2010.

TEDESCHI, R. G.; COLLINS, M. The influence of ENSO on South American precipitation during austral summer and autumn in observations and models. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 2, p. 618-635, 2016.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 3, p. 311-324, 2009.

UIB, A. Report of the HELIOSAT-3 software package for solar irradiance retrieval, all sky working version. [S.l.]: Heliosat-3, 2003.

URRACA, R. et al. Extensive validation of CM-SAF surface radiation products over Europe. **Remote Sensing of Environment**, v. 199, p. 171-186, 2017.

WIELICKI, B. A. et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 5, p. 853-868, 1996.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 3.ed. Ithaca, New York: Elsevier, 2011. 675 p.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Climatic change**. Geneva: WMO, 1966. 79p. (WMO Tech. Note 79, Publ. WMO-195).

YANG, X. et al. Quantifying the interactive impacts of global dimming and warming on wheat yield and water use in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182, p. 342-351, 2013.

ZHANG, W. et al. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. **Global and Planetary Change**, v. 69, n. 1-2, p. 35-47, 2009.

ZHANG, Y. et al. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: Refinements of the radiative transfer model and the input data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 109, n. D19, 2004.

ZHOU, Z. et al. Innovative trend analysis of solar radiation in China during 1962–2015. **Renewable Energy**, v. 119, p. 675-689, 2018.

APÊNDICE A – RESULTADOS COMPLEMENTARES

Tabela A.1. Relatório Geral de Dados Disponíveis do GL1.2.

RELATÓRIO GERAL DE DADOS

Dados Diários GL1.2

	JAN			FEV			MAR			ABR			MAI			JUN			JUL		
	Presente	% Presente	Ausente																		
1998	29	93,5%	2	28	100,0%	0	29	93,5%	2	29	96,7%	1	30	96,8%	1	27	90,0%	3	30	96,8%	1
1999	31	100,0%	0	28	100,0%	0	31	100,0%	0	24	80,0%	6	30	96,8%	1	30	100,0%	0	27	87,1%	4
2000	28	90,3%	3	28	96,6%	1	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0
2001	31	100,0%	0	28	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	18	58,1%	13	30	100,0%	0	30	96,8%	1
2002	31	100,0%	0	28	100,0%	0	30	96,8%	1	30	100,0%	0	21	67,7%	10	30	100,0%	0	31	100,0%	0
2003	29	93,5%	2	28	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	27	90,0%	3	30	96,8%	1
2004	15	48,4%	16	28	96,6%	1	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	28	93,3%	2	31	100,0%	0
2005	19	61,3%	12	28	100,0%	0	31	100,0%	0	28	93,3%	2	31	100,0%	0	30	100,0%	0	25	80,6%	6
2006	28	90,3%	3	28	100,0%	0	31	100,0%	0	28	93,3%	2	31	100,0%	0	29	96,7%	1	30	96,8%	1
2007	31	100,0%	0	26	92,9%	2	31	100,0%	0	30	100,0%	0	30	96,8%	1	30	100,0%	0	31	100,0%	0
2008	30	96,8%	1	27	93,1%	2	30	96,8%	1	28	93,3%	2	31	100,0%	0	29	96,7%	1	30	96,8%	1
2009	30	96,8%	1	28	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	29	96,7%	1	30	96,8%	1
2010	29	93,5%	2	28	100,0%	0	31	100,0%	0	29	96,7%	1	30	96,8%	1	29	96,7%	1	30	96,8%	1
2011	30	96,8%	1	28	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0
2012	30	96,8%	1	0	0,0%	29	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0
2013	29	93,5%	2	28	100,0%	0	25	80,6%	6	29	96,7%	1	30	96,8%	1	28	93,3%	2	31	100,0%	0
2014	31	100,0%	0	28	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0
2015	31	100,0%	0	28	100,0%	0	30	96,8%	1	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0
2016	31	100,0%	0	28	96,6%	1	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	29	96,7%	1	31	100,0%	0
2017	31	100,0%	0	28	100,0%	0	31	100,0%	0	29	96,7%	1	31	100,0%	0	30	100,0%	0	29	93,5%	2
	574	92,0%	46	529	93,2%	36	609	98,2%	11	584	97,3%	16	592	95,3%	28	585	97,4%	15	601	96,8%	19

	AGO			SET			OUT			NOV			DEZ			Presente	% Presente	Total	Ausente
	Presente	% Presente	Ausente																
1998	22	71,0%	9	30	100,0%	0	30	96,8%	1	30	100,0%	0	31	100,0%	0	345	94,5%	365	20
1999	30	96,8%	1	26	86,7%	4	31	100,0%	0	27	90,0%	3	23	74,2%	8	338	92,6%	365	27
2000	29	93,5%	2	30	100,0%	0	25	80,6%	6	29	96,7%	1	31	100,0%	0	353	96,4%	366	13
2001	31	100,0%	0	28	93,3%	2	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	349	95,6%	365	16
2002	30	96,8%	1	29	96,7%	1	31	100,0%	0	29	96,7%	1	30	96,8%	1	350	95,9%	365	15
2003	30	96,8%	1	27	90,0%	3	29	93,5%	2	29	96,7%	1	25	80,6%	6	346	94,8%	365	19
2004	31	100,0%	0	29	96,7%	1	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	346	94,5%	366	20
2005	25	80,6%	6	29	96,7%	1	30	96,8%	1	22	73,3%	8	30	96,8%	1	328	89,9%	365	37
2006	29	93,5%	2	24	80,0%	6	30	96,8%	1	30	100,0%	0	30	96,8%	1	348	95,3%	365	17
2007	27	87,1%	4	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	358	98,1%	365	7
2008	30	96,8%	1	29	96,7%	1	29	93,5%	2	30	100,0%	0	30	96,8%	1	353	96,4%	366	13
2009	28	90,3%	3	30	100,0%	0	30	96,8%	1	28	93,3%	2	30	96,8%	1	355	97,3%	365	10
2010	30	96,8%	1	30	100,0%	0	31	100,0%	0	29	96,7%	1	31	100,0%	0	357	97,8%	365	8
2011	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	29	93,5%	2	362	99,2%	365	3
2012	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	29	93,5%	2	334	91,3%	366	32
2013	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	353	96,7%	365	12
2014	29	93,5%	2	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	29	93,5%	2	361	98,9%	365	4
2015	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	364	99,7%	365	1
2016	31	100,0%	0	30	100,0%	0	30	96,8%	1	30	100,0%	0	31	100,0%	0	363	99,2%	366	3
2017	31	100,0%	0	30	100,0%	0	31	100,0%	0	29	96,7%	1	31	100,0%	0	361	98,9%	365	4
	587	94,4%	33	581	96,7%	19	605	97,5%	15	582	96,9%	18	595	95,8%	25	Total dados ausentes		281	

nenhum 1
 1-20 dias 3
 21-25 dias 11
 26 dias-incompleto 88
 completo 137

Base temporal mensal e em 1998 não havia dados *in situ* disponíveis.

Tabela A.2. Relatório Geral de Dados Disponíveis de Superfície.

SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

Próprias																				Total	
Estação (SIGLA)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		2017
Brasília (BRB)							4	11	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12		133	
Cachoeira Paulista (CPA)																	10	12	12	12	46
Caicó (CAI)				3	12	12	12	12	12	4								2	1		70
Campo Grande (CGR)						11	10					12	12	12	12	2	12	8	8		123
Cuiabá (CBA)									12	12	12	12	12	12	12						84
Ouroinhos (ORN)									11	12	12	12	12	4				4	1		68
Palmas (PMA)								9	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	10		137
Petrolina (PTR)						6	7	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	155
Rolim de Moura (RLM)										7											7
São Luiz (SLZ)										6	5	12	12		9	12	12	12	12	9	101
São Martinho da Serra (SMS)								12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	152
Parceiras																				Total	
Estação (SIGLA)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		2017
Chapecó (CHP)												12									12
Curitiba (CTB)																	4	11			15
Florianópolis (FLN)						5	4						3	12	12	6	12	12	8		74
Joinville (JOI)												12	10	12	12	12	12	10			80
Natal (NAT)										6	12	12	12	12	12		2	12	12	9	101
Sombrio (SBR)							7	10	11	3		11	12	9	11	12	12	12	10		120
SolRad-Net - Rede de Radiação Solar																				Total	
Estação (SIGLA)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		2017
Abracos Hill		12	10	10	8	8	12	10													70
Alta Floresta		12	12	3	12	9	5	9	12			7	11	11	12	12	12	3	10	2	154
Balbina		4	12	8	11	12	1														48
Belterra		4	12	12	12	11	6	5													62
Cuiabá Miranda				8	10	9	12	11	12	12	12	4	12	12	12	12	12	12	12	6	180
Ji Paraná							1	12	7	2	6	11	12	11	10	12	12	12	6		114
Manaus											8	4									12
Manaus - Embrapa																	5	8	5		18
Rio Branco			5	7	11	11	8	6	10	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	6	182

Tabela A.3. Período completo de dados disponíveis nas estações.

	Estação	Rede	Período detalhado de dados disponíveis
Norte	*Abracos Hill	SolRad-Net	jan99-abr00 / jun00-ago00 / out00-mai01 / ago01-dez01 / mai02-mar03 / ago03-out05
	*Balbina	SolRad-Net	set99-dez00 / fev01-mar01 / jul01-jun02 / ago02-jan04
	*Belterra	SolRad-Net	set99-nov03 / jul04-mai05
	*Ji Paraná	SolRad-Net	dez05-jul07 / ago08-set08 / jun09-ago09 / out09-jun10 / ago10-out12 / dez12-jun13 / set13-jun17
	*Manaus	SolRad-Net	mar08-abr08 / jul08-abr09
	*Manaus-Embrapa	SolRad-Net	ago15-jun16 / nov16-mar17 / mai17-jun17
	Palmas	SONDA	abr05-mar07 / jun07-out16
	*Rio Branco	SolRad-Net	ago00-mar01 / mai01-jul01 / dez01-mar02 / mai02-nov03 / mai04-fev05 / set05-out06 / jan07-jan15 / mar15-out15 / dez15-jun17
Rolim de Moura	SONDA	jan07-fev07 / jul07-nov07	
Centro-Oeste	*Alta Floresta	SolRad-Net	jan99-dez00 / jun01-ago01 / jan02-set03 / ago04-mai05 / set05-dez06 / jun09-jun10 / ago10-nov11 / jan12-mar15 / mar16-fev17
	Brasília	SONDA	jun04-set04 / fev05-dez07 / mar08-dez15
	Campo Grande	SONDA	fev04-dez04 / mar05-jan06 / jan07-dez10 / jan11-jan13 / dez13-fev15 / jul15-ago16
	Cuiabá	SONDA	jan06-dez12
	*Cuiabá-Miranda	SolRad-Net	abr01-nov01 / mar02-dez02 / abr03-mai05 / jul05-dez08 / set09-jun17
Nordeste	Caicó	SONDA	out02-abr08 / nov15-jan16
	Natal	SONDA p	jul07-dez12 / nov14-set17
	Petrolina	SONDA	jul04-abr05 / ago05-set05 / dez05-abr06 / jun06 / ago06-dez17
	São Luiz	SONDA	jan07-abr07 / jun07-jul07 / jan08-mai08 / jan09-dez10 / abr12-set17
Sudeste	Cachoeira Paulista	SONDA	mar14-dez17
	Ourinhos	SONDA	fev06-abr11 / set15-dez15 / mar16
Sul	Chapecó	SONDA p	jan09-dez09
	Curitiba	SONDA p	set14-nov15
	Florianópolis	SONDA p	ago04-abr05 / jan10-mar10 / jan11-fev13 / set13-mai16 / ago16-out16
	Joinville	SONDA p	jan09-mai10 / ago10-out15
	São Martinho da Serra	SONDA	jan05-fev06 / abr06-set17
	Sombrio	SONDA p	jan04-mai04 / out04 / dez04-jan05 / abr05-ago06 / out06-mar07 / fev09-set11 / fev12-out16

Tabela A.4. Estatística completa da quantidade de dados diários do modelo GL e dos dados observacionais nas estações.

Estação	Rede	Quantidade de dados diários									
		do GL		de superfície							
		(100%) arquivos disponíveis do GL1.2	filtro3: 20<GL<400	(100%) filtro R e 1: na rede OBS / 1 ou 2 min - CQ e OBS>0 (< 2h sem dados excluído)	filtro2: 20<OBS<400	filtro4: (GL-OBS)<100	filtro5: mínimo 20 dias =				
Norte	* Abracos Hill	SolRad-Net	6889	98,1%	1418	1418	100,0%	1281	90,3%	866	61,1%
	* Balbina	SolRad-Net	6874	97,9%	1168	1168	100,0%	1058	90,6%	945	80,9%
	* Belterra	SolRad-Net	6860	97,7%	1432	1432	100,0%	1279	89,3%	998	69,7%
	* Ji Paraná	SolRad-Net	6890	98,1%	2862	2860	99,9%	2719	95,0%	2530	88,4%
	* Manaus	SolRad-Net	6866	97,8%	224	224	100,0%	205	91,5%	167	74,6%
	* Manaus-Embrapa	SolRad-Net	6869	97,8%	356	354	99,4%	346	97,2%	288	80,9%
	Palmas	SONDA	6621	94,3%	3467	3466	100,0%	3109	89,7%	2661	76,8%
	* Rio Branco	SolRad-Net	6885	98,0%	4416	4412	99,9%	4207	95,3%	3738	84,6%
	Rolim de Moura	SONDA	6893	98,2%	0	0	-	0	-	0	-
Centro-Oeste	* Alta Floresta	SolRad-Net	6852	97,6%	3776	3773	99,9%	3520	93,2%	2931	77,6%
	Brasília	SONDA	6687	95,2%	3736	3736	100,0%	3515	94,1%	3393	90,8%
	Campo Grande	SONDA	6612	94,2%	3237	3233	99,9%	2993	92,5%	2770	85,6%
	Cuiabá	SONDA	6738	96,0%	2009	2008	100,0%	1919	95,5%	1783	88,8%
	* Cuiabá-Miranda	SolRad-Net	6736	95,9%	4745	4740	99,9%	4367	92,0%	4073	85,8%
Nordeste	Caicó	SONDA	6824	97,2%	1996	1996	100,0%	1835	91,9%	1784	89,4%
	Natal	SONDA p	6867	97,8%	2184	2181	99,9%	2070	94,8%	1872	85,7%
	Petrolina	SONDA	6751	96,1%	3788	3788	100,0%	3594	94,9%	3352	88,5%
	São Luiz	SONDA	6684	95,2%	2739	2735	99,9%	2521	92,0%	2353	85,9%
Sudeste	Cachoeira Paulista	SONDA	6691	95,3%	1290	1290	100,0%	1180	91,5%	1075	83,3%
	Ourinhos	SONDA	6650	94,7%	1551	1548	99,8%	1456	93,9%	1269	81,8%
Sul	Chapecó	SONDA p	6637	94,5%	311	310	99,7%	289	92,9%	270	86,8%
	Curitiba	SONDA p	6635	94,5%	413	412	99,8%	385	93,2%	364	88,1%
	Florianópolis	SONDA p	6645	94,6%	1888	1869	99,0%	1722	91,2%	1619	85,8%
	Joinville	SONDA p	6622	94,3%	2359	2304	97,7%	2145	90,9%	2063	87,5%
	São Martinho da Serra	SONDA	6641	94,6%	4188	4135	98,7%	3842	91,7%	3613	86,3%
	Sombrio	SONDA p	6599	94,0%	3076	3009	97,8%	2718	88,4%	2400	78,0%

Tabela A.5. Estatística completa da quantidade de dados mensais do modelo GL e dos dados observacionais nas estações.

Estação	Rede	Quantidade de dados mensais			
		do GL	de superfície		
		(100%) filtro3: 20<GL<400	(100%) meses com arquivos de dados disponíveis	filtros R, 1, 2, 4 e 5	
Norte	* Abracos Hill	SolRad-Net	70	35	50,0%
	* Balbina	SolRad-Net	47	36	76,6%
	* Belterra	SolRad-Net	61	38	62,3%
	* Ji Paraná	SolRad-Net	113	91	80,5%
	* Manaus	SolRad-Net	12	6	50,0%
	* Manaus-Embrapa	SolRad-Net	18	12	66,7%
	Palmas	SONDA	136	101	74,3%
	* Rio Branco	SolRad-Net	181	136	75,1%
	Rolim de Moura	SONDA	0	0	-
Centro-Oeste	* Alta Floresta	SolRad-Net	153	107	69,9%
	Brasília	SONDA	132	123	93,2%
	Campo Grande	SONDA	121	101	83,5%
	Cuiabá	SONDA	77	67	87,0%
	* Cuiabá-Miranda	SolRad-Net	240	177	82,5%
Nordeste	Caicó	SONDA	70	65	92,9%
	Natal	SONDA p	93	64	68,8%
	Petrolina	SONDA	143	123	86,0%
	São Luiz	SONDA	96	84	87,5%
Sudeste	Cachoeira Paulista	SONDA	46	39	84,8%
	Ourinhos	SONDA	67	46	68,7%
Sul	Chapecó	SONDA p	12	11	91,7%
	Curitiba	SONDA p	15	13	86,7%
	Florianópolis	SONDA p	73	59	80,8%
	Joinville	SONDA p	80	74	92,5%
	São Martinho da Serra	SONDA	152	133	87,5%
	Sombrio	SONDA p	117	89	76,1%

Os resultados das tabelas representam o conjunto de medidas em diferentes agrupamentos durante o período entre 1998-2017.

Tabela A.6. Média e desvio padrão com dados diários do modelo GL nas estações.

do GL diários 20 anos				
	Estação	Rede	DP (W.m ⁻²)	Média (W.m ⁻²)
Norte	* Abracos Hill	SolRad-Net	59,9	215,6
	* Balbina	SolRad-Net	69,3	224,7
	* Belterra	SolRad-Net	62,9	229,3
	* Ji Paraná	SolRad-Net	59,7	218,2
	* Manaus	SolRad-Net	68,4	215,6
	* Manaus-Embrapa	SolRad-Net	68,3	211,0
	Palmas	SONDA	62,7	234,7
	* Rio Branco	SolRad-Net	66,4	211,6
	Rolim de Moura	SONDA	58,6	218,9
Centro-Oeste	* Alta Floresta	SolRad-Net	59,8	225,6
	Brasília	SONDA	59,7	223,5
	Campo Grande	SONDA	70,4	216,0
	Cuiabá	SONDA	63,2	222,3
	* Cuiabá-Miranda	SolRad-Net	63,9	224,3
Nordeste	Caicó	SONDA	48,5	244,6
	Natal	SONDA p	54,9	244,6
	Petrolina	SONDA	61,8	236,3
	São Luiz	SONDA	55,7	219,1
Sudeste	Cachoeira Paulista	SONDA	79,5	197,3
	Ourinhos	SONDA	77,5	211,0
Sul	Chapecó	SONDA p	91,6	197,1
	Curitiba	SONDA p	78,7	169,0
	Florianópolis	SONDA p	88,9	181,9
	Joinville	SONDA p	83,1	152,8
	São Martinho da Serra	SONDA	96,2	190,3
	Sombrio	SONDA p	85,7	163,1
Média estações			69,1	211,5
Norte			64,0	220,0
Centro-Oeste			63,4	222,3
Nordeste			55,2	236,2
Sudeste			78,5	204,2
Sul			87,4	175,7

(continua)

Tabela A.6. Conclusão.

com dados diários do GL em 20 anos em cada mês																									
		Jan		Fev		Mar		Abr		Mai		Jun		Jul		Ago		Set		Out		Nov		Dez	
Estação		Média	DP																						
		(W.m ⁻²)																							
Norte	* Abracos Hill	191,1	20,3	183,3	16,1	197,0	14,6	212,7	20,7	205,0	16,9	220,8	14,2	234,5	14,5	247,7	10,8	244,3	14,7	236,2	18,7	218,6	24,0	190,2	25,2
	* Balbina	201,9	28,9	200,0	31,9	195,7	15,5	198,3	14,5	198,9	15,3	223,0	16,4	235,6	14,8	264,7	15,1	265,2	20,6	251,8	16,0	242,3	20,5	218,6	23,0
	* Belterra	203,7	22,7	199,8	21,7	196,0	20,5	197,9	20,0	198,2	15,9	215,8	14,4	236,3	14,7	269,3	11,0	280,5	14,9	270,1	17,6	255,8	20,2	226,1	28,1
	* Ji Paraná	191,2	19,0	188,1	17,1	199,2	17,6	213,6	19,4	205,9	17,3	222,2	14,2	237,8	12,3	251,8	11,9	249,9	14,8	238,4	17,7	220,5	21,8	194,0	27,1
	* Manaus	188,5	24,9	193,2	31,8	188,9	15,3	188,5	12,9	191,8	17,2	216,1	18,0	228,9	13,0	258,3	14,4	255,7	21,6	246,9	14,4	228,5	16,6	200,5	24,0
	* Manaus-Embrapa	183,4	24,8	190,4	31,0	182,4	14,0	183,4	13,0	185,4	19,5	210,1	17,3	228,2	13,2	254,0	13,7	252,3	22,1	242,5	16,4	224,4	17,8	195,7	22,9
	Palmas	210,5	16,6	213,4	29,5	218,3	15,7	228,6	20,7	235,8	13,1	243,4	7,8	256,8	6,5	276,1	8,3	270,3	25,8	243,9	28,0	218,1	21,1	210,9	25,2
	* Rio Branco	186,6	18,5	186,4	14,7	194,7	15,8	202,6	18,5	194,9	16,1	203,6	19,4	225,3	15,3	246,1	11,7	245,0	16,3	232,7	13,5	223,0	16,9	195,4	27,0
	Rolim de Moura	191,9	22,3	191,1	18,4	204,3	18,6	218,9	16,3	208,9	16,7	223,1	11,1	235,1	13,0	250,3	10,7	247,9	17,6	234,6	14,5	219,3	24,2	195,8	26,0
	* Alta Floresta	198,5	20,5	200,3	20,8	207,5	17,1	221,5	18,6	224,0	16,3	237,7	8,9	248,1	9,2	258,0	9,2	247,4	15,5	241,5	15,2	220,0	20,8	199,5	30,6
Centro-Oeste	Brasília	219,5	25,5	229,9	27,3	219,9	22,7	224,6	14,9	214,8	13,3	212,5	9,2	221,5	7,7	243,9	14,0	250,7	22,8	235,0	31,8	205,2	20,5	210,8	33,6
	Campo Grande	227,1	28,1	226,8	23,3	221,0	21,1	213,5	15,1	179,9	17,2	173,7	15,1	183,9	15,8	214,5	15,8	227,3	19,0	235,9	13,9	245,9	19,6	233,1	25,8
	Cuiabá	215,5	20,1	220,1	19,6	221,7	18,4	218,7	12,8	200,1	16,1	202,2	17,7	210,2	13,4	238,2	10,2	238,3	15,3	232,8	17,1	235,5	19,8	227,6	22,8
	* Cuiabá-Miranda	220,5	21,2	223,1	18,6	225,2	18,6	222,8	13,2	201,4	16,7	202,8	18,0	210,3	13,6	238,8	14,9	238,8	14,9	233,6	16,5	238,1	18,7	229,9	21,4
Nordeste	Caicó	238,9	14,6	243,6	18,4	254,1	13,4	244,3	14,3	230,2	13,3	209,8	12,3	215,7	18,0	246,3	16,0	267,8	15,3	271,9	13,5	267,2	16,0	241,1	17,9
	Natal	246,7	23,4	246,9	27,3	251,6	16,2	234,3	20,0	223,1	19,9	202,5	16,4	209,9	20,4	242,0	15,0	264,3	15,0	275,0	9,2	273,8	13,6	259,1	19,3
	Petrolina	245,1	24,7	239,4	22,2	241,8	20,4	230,1	21,4	200,0	20,2	194,0	17,2	201,6	13,9	235,4	17,2	261,7	17,9	270,8	19,6	264,0	23,6	248,6	25,0
	São Luiz	189,7	22,4	192,8	30,4	180,8	18,6	187,1	19,9	204,1	24,7	218,0	18,4	227,9	10,6	252,1	13,4	259,5	13,8	258,0	12,2	243,8	14,7	220,3	14,5
Sudeste	Cachoeira Paulista	208,2	42,8	228,1	32,3	208,9	23,5	196,1	20,4	165,4	12,1	160,1	14,4	162,9	13,5	195,7	20,7	202,7	26,6	213,6	27,3	207,7	18,1	217,9	32,5
	Ourinhos	226,6	39,7	228,4	25,1	218,7	21,6	209,8	16,8	171,2	15,5	162,9	17,8	169,9	17,1	202,3	17,7	220,7	22,9	233,2	18,0	245,2	24,5	243,8	30,2
Sul	Chapecó	249,0	32,3	230,8	26,4	213,3	22,9	180,4	18,1	137,0	18,2	125,3	13,0	137,3	15,0	166,8	20,3	192,8	22,8	217,1	25,4	256,9	31,2	251,9	25,5
	Curitíba	194,2	31,5	197,5	27,1	179,8	27,1	156,9	20,8	132	16,1	126,6	17,1	134,8	15,8	166,5	21,0	170,8	32,0	177,1	26,4	197,1	25,9	196,8	15,9
	Florianópolis	232,5	25,9	223,9	27,5	205,8	20,8	170,7	18,5	141,2	16,9	125,7	13,8	130,9	15,1	154,1	20,2	166,8	18,7	185,4	30,7	214,5	29,9	228,2	20,0
	Joinville	188,5	27,9	186,3	28,6	170,5	28,0	151,1	22,1	130,1	17,9	116,3	13,3	119,9	17,5	139,3	19,5	135,4	21,6	147,8	27,1	171,2	28,5	177,8	18,8
	São Martinho da Serra	251,6	33,6	235,2	22,9	204,9	20,8	163,8	17,4	128,9	14,9	114,3	9,4	122,6	14,5	149,2	20,3	179,8	19,8	210,3	23,6	255,6	30,9	256,0	29,5
	Sombrio	194,5	32,3	187,9	28,6	170,5	18,5	153,5	20,1	129,5	17,7	116,5	11,2	125,6	15,2	147,7	20,2	158,6	22,2	171,9	26,2	199,9	35,4	199,8	22,2
Média estações		211,4	25,6	211,0	24,6	206,6	19,1	200,9	17,7	186,1	16,7	187,7	14,5	198,1	14,0	223,4	15,1	230,6	19,4	231,1	19,6	230,5	22,1	218,1	24,4
Norte		194,3	22,0	194,0	23,6	197,4	16,4	204,9	17,3	202,8	16,4	219,8	14,8	235,4	13,0	257,6	12,0	256,8	18,7	244,1	17,4	227,8	20,3	203,0	25,4
Centro-Oeste		216,2	23,1	220,0	21,9	219,1	19,6	220,2	14,9	204,0	15,9	205,8	13,8	214,8	11,9	238,7	12,8	240,5	17,5	235,8	18,9	228,9	19,9	220,2	26,8
Nordeste		230,1	21,3	230,7	24,6	232,1	17,2	224,0	18,9	214,4	19,5	206,1	16,1	213,8	15,7	244,0	15,4	263,3	15,5	268,9	13,6	262,2	17,0	242,3	19,2
Sudeste		217,4	41,3	228,3	28,7	213,8	22,6	203,0	18,6	168,3	13,8	161,5	16,1	166,4	15,3	199,0	19,2	211,7	24,8	223,4	22,7	226,5	21,3	230,9	31,4
Sul		218,4	30,6	210,3	26,9	190,8	23,0	162,7	19,5	133,1	17,0	120,8	13,0	128,5	15,5	153,9	20,3	167,4	22,9	184,9	26,6	215,9	30,3	218,4	22,0

Tabela A.7. Resultados de MBE, MAE, RMSE, R² e SDD dos dados diários e mensais, comparativo entre o GL e a verdade terrestre.

Comparação com dados diários											
Estação	Rede	Média OBS no período (W.m ⁻²)	MBE (W.m ⁻²)	MBE (%)	SDD do MBE (W.m ⁻²)	SDD (%)	MAE (W.m ⁻²)	RMSE (W.m ⁻²)	RMSE (%)	R ²	
Norte	* Abracos Hill	SolRad-Net	199,6	12,7	6,4%	32,0	16,0%	27,8	34,4	17,2%	0,71
	* Balbina	SolRad-Net	206,0	23,7	11,5%	31,4	15,2%	32,3	39,3	19,1%	0,77
	* Belterra	SolRad-Net	206,8	22,1	10,7%	31,7	15,3%	31,9	38,6	18,7%	0,74
	* Ji Paraná	SolRad-Net	204,6	17,9	8,7%	23,8	11,6%	24,1	29,7	14,5%	0,84
	* Manaus	SolRad-Net	186,1	17,8	9,6%	26,5	14,2%	26,1	31,9	17,1%	0,89
	* Manaus-Embrapa	SolRad-Net	191,4	22,5	11,8%	22,9	12,0%	26,8	32,1	16,8%	0,91
	Palmas	SONDA	217,1	21,8	10,0%	28,0	12,9%	30,0	35,5	16,4%	0,79
	* Rio Branco	SolRad-Net	197,0	13,7	7,0%	28,3	14,4%	25,3	31,4	15,9%	0,82
	Rolim de Moura	SONDA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Centro-Oeste	* Alta Floresta	SolRad-Net	209,1	17,6	8,4%	28,8	13,8%	27,4	33,7	16,1%	0,77
	Brasília	SONDA	225,9	0,4	0,2%	22,9	10,1%	16,8	22,9	10,1%	0,85
	Campo Grande	SONDA	217,3	1,3	0,6%	22,3	10,3%	16,9	22,4	10,3%	0,90
	Cuiabá	SONDA	214,4	8,2	3,8%	24,4	11,4%	21,0	25,7	12,0%	0,85
	* Cuiabá-Miranda	SolRad-Net	210,2	15,8	7,5%	24,5	11,7%	23,9	29,2	13,9%	0,86
Nordeste	Caicó	SONDA	243,4	5,9	2,4%	26,3	10,8%	21,7	27,0	11,1%	0,70
	Natal	SONDA p	252,1	-4,2	-1,7%	24,8	9,8%	17,7	25,1	10,0%	0,82
	Petrolina	SONDA	236,0	6,8	2,9%	21,3	9,0%	17,8	22,4	9,5%	0,88
	São Luiz	SONDA	204,2	11,5	5,6%	21,4	10,5%	20,1	24,3	11,9%	0,85
Sudeste	Cachoeira Paulista	SONDA	205,9	-2,2	-1,1%	21,2	10,3%	15,9	21,3	10,3%	0,94
	Ourinhos	SONDA	200,2	2,7	1,3%	25,9	12,9%	20,5	26,0	13,0%	0,88
Sul	Chapecó	SONDA p	205,0	-17,5	-8,5%	20,9	10,2%	19,9	27,3	13,3%	0,94
	Curitiba	SONDA p	175,4	-6,1	-3,5%	18,7	10,7%	14,9	19,7	11,2%	0,95
	Florianópolis	SONDA p	180,1	7,0	3,9%	25,2	14,0%	19,0	26,1	14,5%	0,93
	Joinville	SONDA p	135,0	16,8	12,4%	28,0	20,7%	26,5	32,7	24,2%	0,91
	São Martinho da Serra	SONDA	204,8	-7,3	-3,6%	20,9	10,2%	16,0	22,1	10,8%	0,95
	Sombrio	SONDA p	163,5	0,4	0,2%	25,5	15,6%	18,8	25,5	15,6%	0,91
Média estações				8,4	4,3%	25,1	12,5%	22,4	28,3	14,1%	0,85

	Média OBS no período (W.m ⁻²)	MBE (W.m ⁻²)	MBE (%)	SDD do MBE (W.m ⁻²)	SDD (%)	MAE (W.m ⁻²)	RMSE (W.m ⁻²)	RMSE (%)	R ²	Qtd dias usados
Norte	201,1	19,0	9,5%	28,1	14,0%	28,0	34,1	17,0%	0,81	14204
Centro-Oeste	215,4	8,7	4,1%	24,6	11,4%	21,2	26,8	12,5%	0,84	16314
Nordeste	233,9	5,0	2,3%	23,5	10,0%	19,3	24,7	10,6%	0,81	10020
Sudeste	203,1	0,3	0,1%	23,6	11,6%	18,2	23,7	11,7%	0,91	2636
Sul	177,3	-1,1	0,2%	23,2	13,6%	19,2	25,6	14,9%	0,93	11101

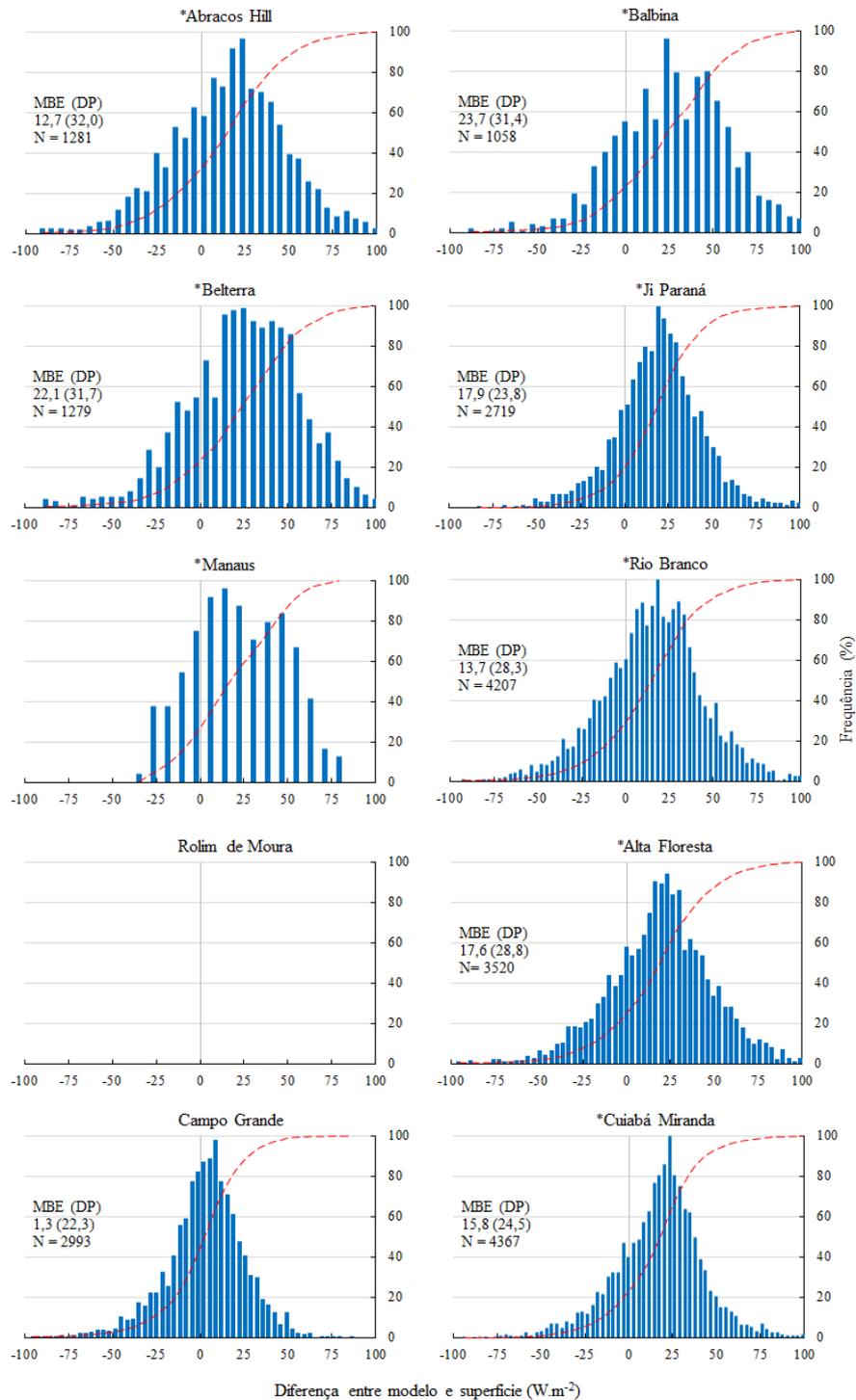
(continua)

Tabela A.7. Conclusão.

Comparação com dados mensais											
Estação	Rede	Média OBS no período (W.m ⁻²)	MBE (W.m ⁻²)	MBE (%)	SDD do MBE (W.m ⁻²)	SDD (%)	MAE (W.m ⁻²)	RMSE (W.m ⁻²)	RMSE (%)	R ²	
Norte	* Abracos Hill	SolRad-Net	202,1	9,5	4,7%	20,7	10,2%	19,1	22,8	11,3%	0,34
	* Balbina	SolRad-Net	208,0	25,2	12,1%	15,4	7,4%	25,3	29,5	14,2%	0,72
	* Belterra	SolRad-Net	206,6	22,2	10,7%	20,7	10,0%	24,1	30,3	14,7%	0,76
	* Ji Paraná	SolRad-Net	204,7	18,3	8,9%	13,3	6,5%	20,2	22,6	11,0%	0,74
	* Manaus	SolRad-Net	189,5	20,8	11,0%	9,0	4,7%	20,8	22,7	12,0%	0,95
	* Manaus-Embrapa	SolRad-Net	191,7	23,0	12,0%	8,8	4,6%	23,0	24,7	12,9%	0,98
	Palmas	SONDA	217,4	22,1	10,2%	19,4	8,9%	25,5	29,4	13,5%	0,52
	* Rio Branco	SolRad-Net	197,8	13,9	7,0%	19,4	9,8%	19,1	23,8	12,0%	0,53
	Rolim de Moura	SONDA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Centro-Oeste	* Alta Floresta	SolRad-Net	209,7	17,4	8,3%	18,3	8,7%	21,6	25,2	12,0%	0,46
	Brasília	SONDA	226,5	0,6	0,3%	13,3	5,9%	10,3	13,4	5,9%	0,76
	Campo Grande	SONDA	218,4	1,1	0,5%	15,1	6,9%	11,7	15,1	6,9%	0,81
	Cuiabá	SONDA	214,5	7,7	3,6%	15,8	7,4%	15,1	17,5	8,2%	0,63
	* Cuiabá-Miranda	SolRad-Net	211,8	16,1	7,6%	16,1	7,6%	19,0	22,8	10,8%	0,53
Nordeste	Caicó	SONDA	242,9	6,2	2,6%	19,2	7,9%	16,6	20,2	8,3%	0,59
	Natal	SONDA p	244,9	0,2	0,1%	12,5	5,1%	8,7	12,5	5,1%	0,85
	Petrolina	SONDA	235,5	7,5	3,2%	11,1	4,7%	10,7	13,4	5,7%	0,90
	São Luiz	SONDA	204,8	11,3	5,5%	14,1	6,9%	15,8	18,1	8,8%	0,83
Sudeste	Cachoeira Paulista	SONDA	210,1	-2,9	-1,4%	8,2	3,9%	6,9	8,7	4,1%	0,97
	Ourinhos	SONDA	200,1	3,5	1,7%	14,4	7,2%	11,8	14,8	7,4%	0,82
Sul	Chapecó	SONDA p	198,7	-16,9	-8,5%	8,4	4,2%	16,9	18,9	9,5%	0,98
	Curitiba	SONDA p	173,9	-6,1	-3,5%	6,0	3,5%	7,5	8,6	4,9%	0,98
	Florianópolis	SONDA p	180,0	6,9	3,8%	10,7	5,9%	10,2	12,7	7,1%	0,95
	Joinville	SONDA p	134,8	16,2	12,0%	16,0	11,9%	20,5	22,8	16,9%	0,79
	São Martinho da Serra	SONDA	204,8	-7,6	-3,7%	13,4	6,5%	10,6	15,4	7,5%	0,96
	Sombrio	SONDA p	163,4	0,2	0,1%	14,4	8,8%	10,4	14,4	8,8%	0,87
Média estações				8,7	4,4%	14,1	7,0%	16,1	19,2	9,6%	0,77

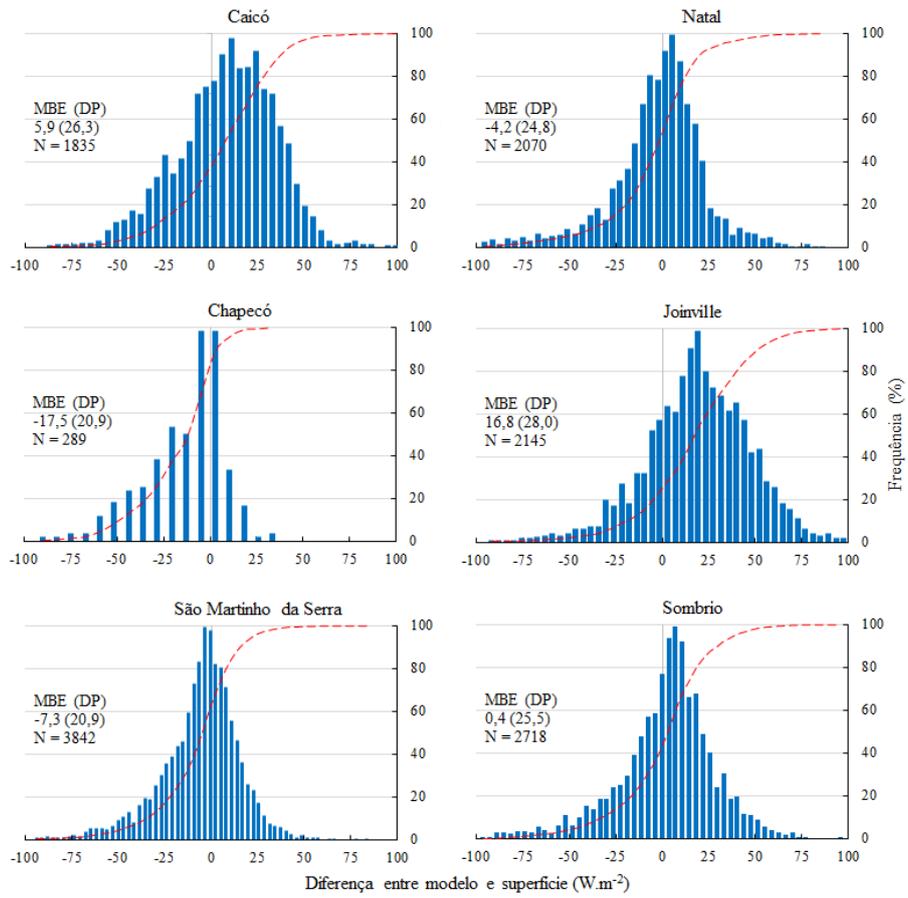
	Média OBS no período (W.m ⁻²)	MBE (W.m ⁻²)	MBE (%)	SDD do MBE (W.m ⁻²)	SDD (%)	MAE (W.m ⁻²)	RMSE (W.m ⁻²)	RMSE (%)	R ²	Qtd meses usados
Norte	202,2	19,4	9,6%	15,8	7,8%	22,1	25,7	12,7%	0,69	455
Centro-Oeste	216,2	8,6	4,1%	15,7	7,3%	15,5	18,8	8,8%	0,64	544
Nordeste	232,0	6,3	2,8%	14,2	6,2%	13,0	16,1	7,0%	0,79	336
Sudeste	205,1	0,3	0,2%	11,3	5,5%	9,4	11,8	5,8%	0,89	85
Sul	175,9	-1,2	0,0%	11,5	6,8%	12,7	15,5	9,1%	0,92	379

Figura A.1. Histogramas dos desvios e diagramas de dispersão com resultados de dados diários de outras estações estudadas.



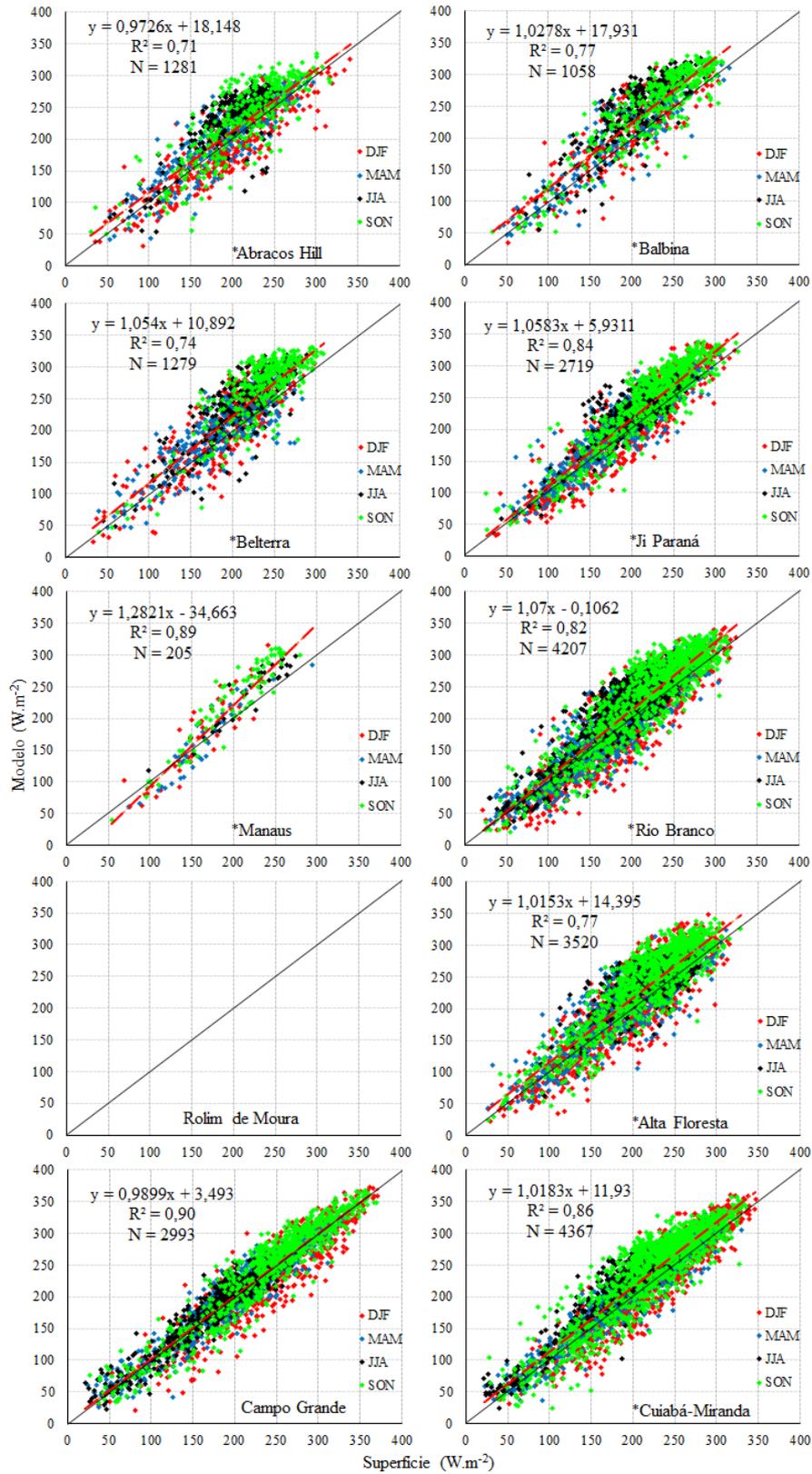
(continua)

Figura A.1. Continuação.



(continua)

Figura A.1. Continuação.



(continua)

Figura A.1. Conclusão.

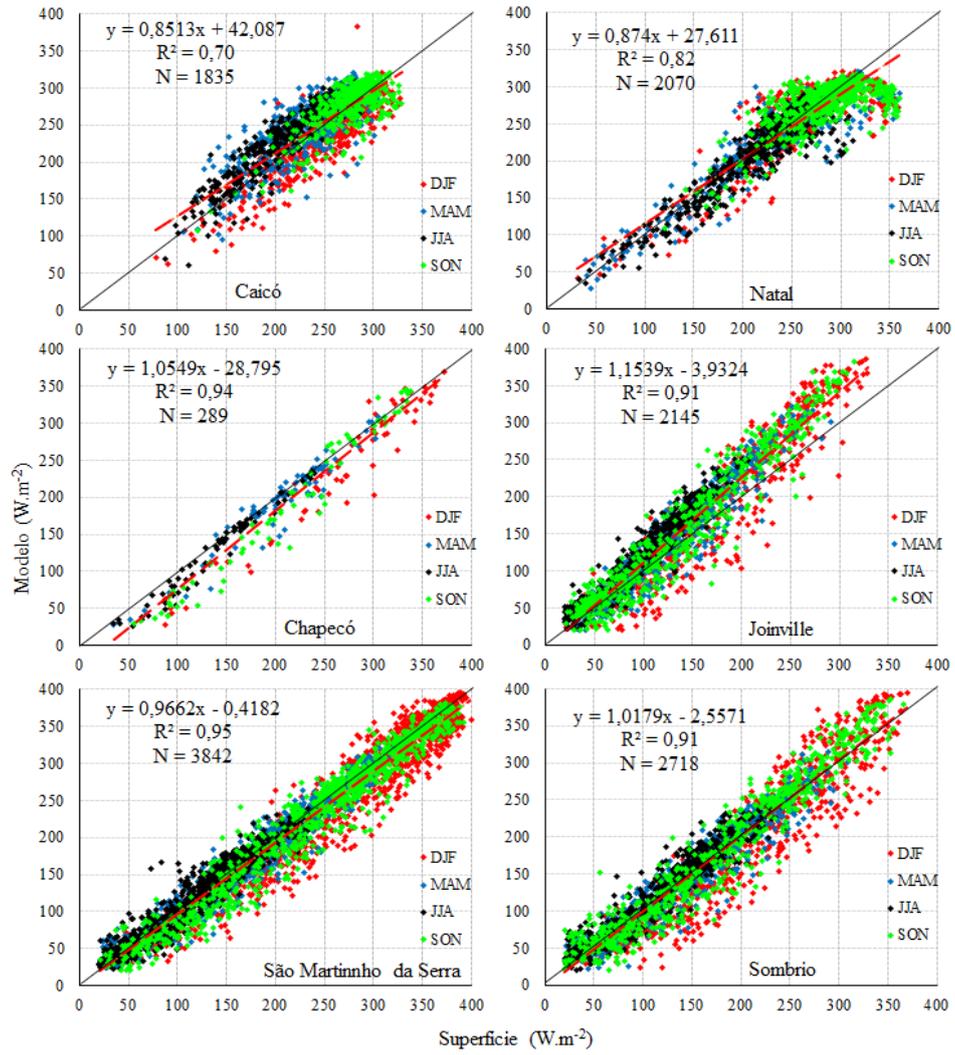
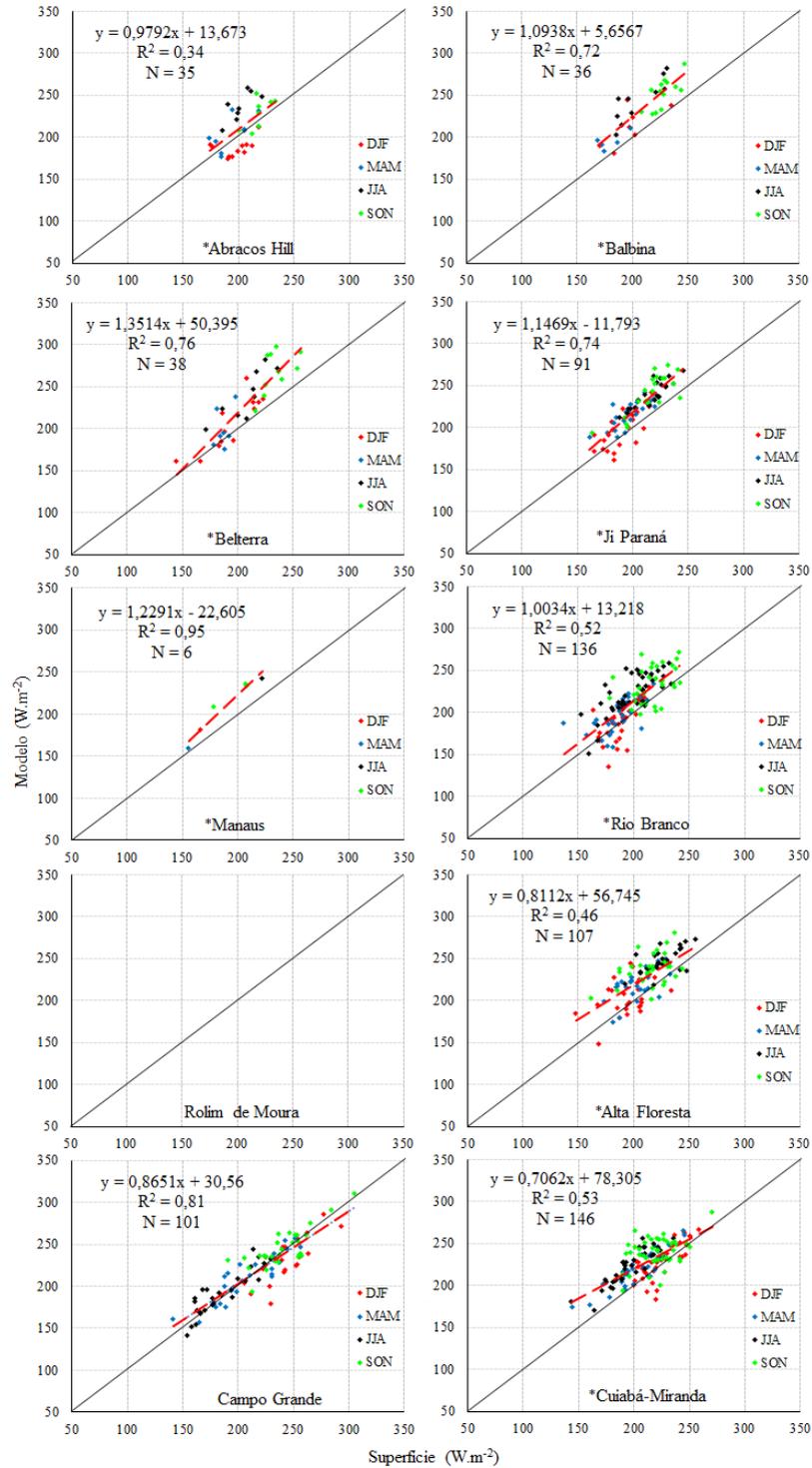


Figura A.2. Diagramas de dispersão com resultados de dados mensais de outras estações estudadas.



(continua)

Figura A.2. Conclusão.

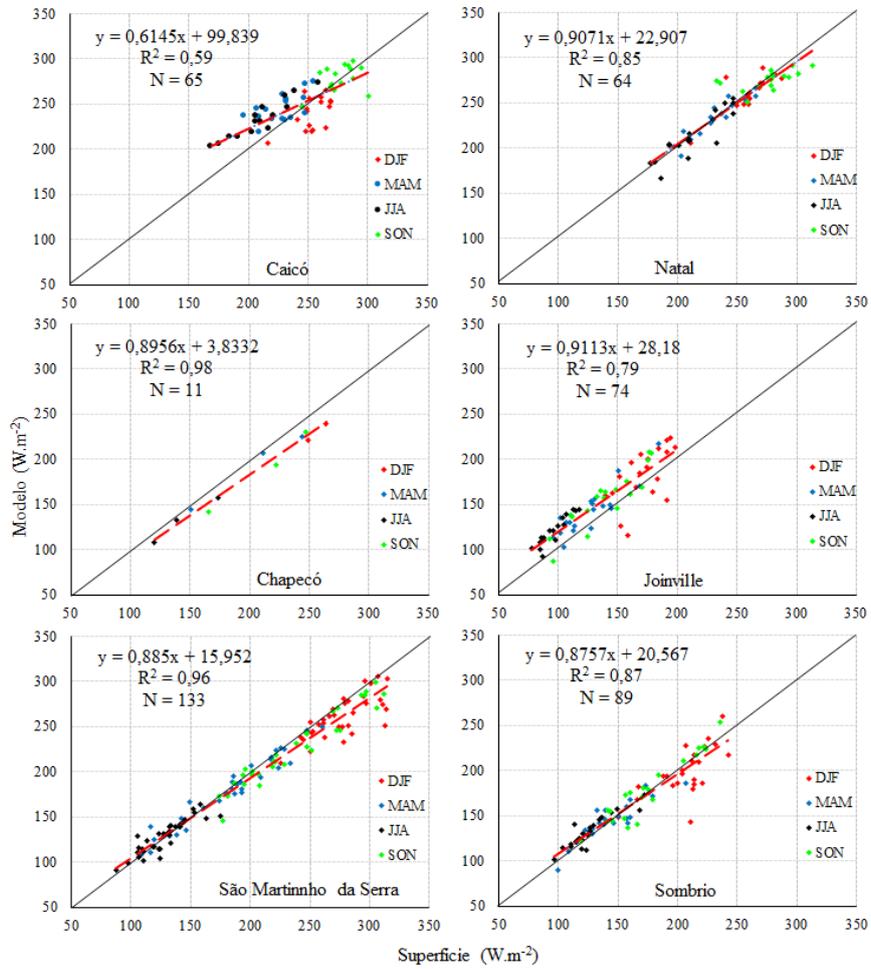
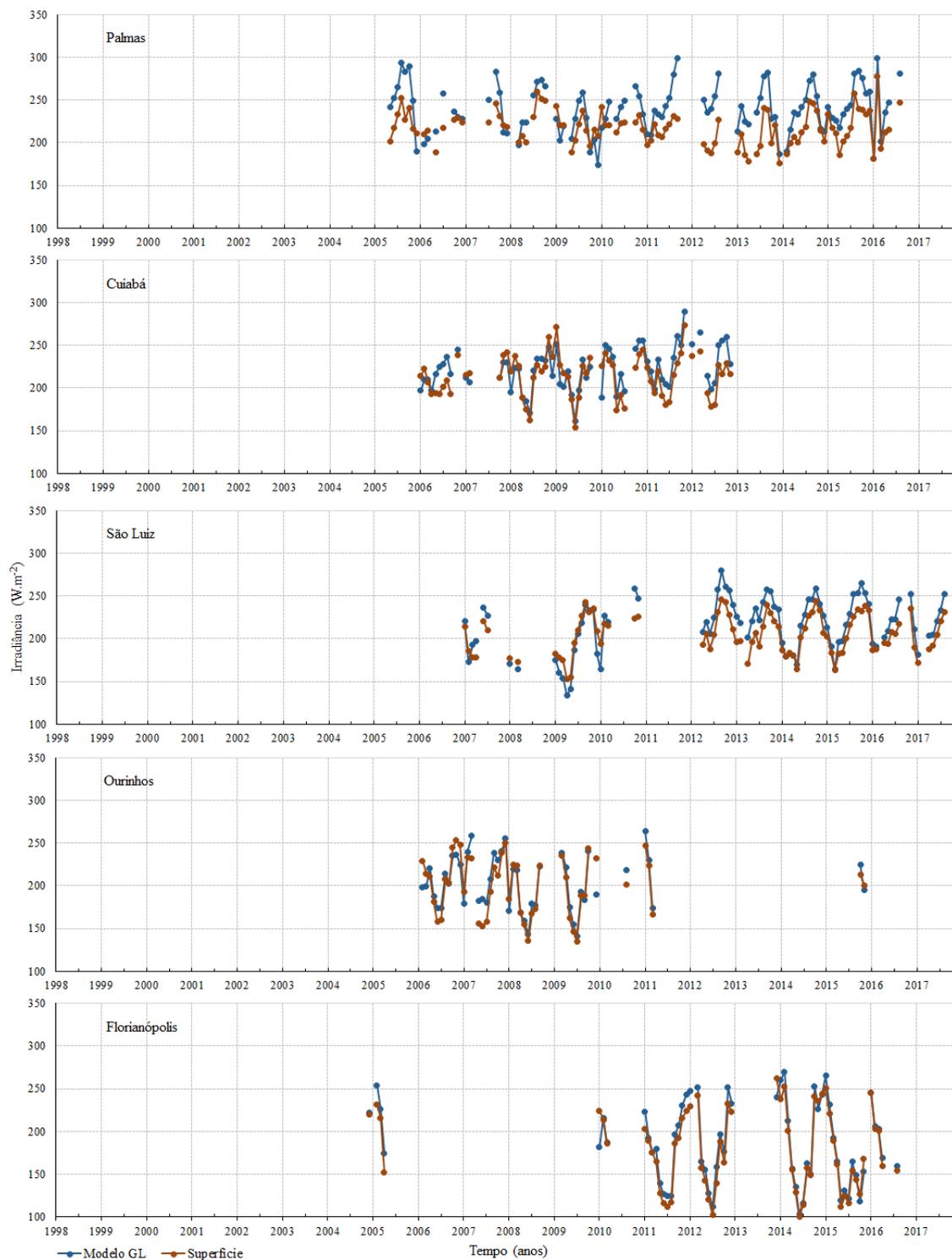
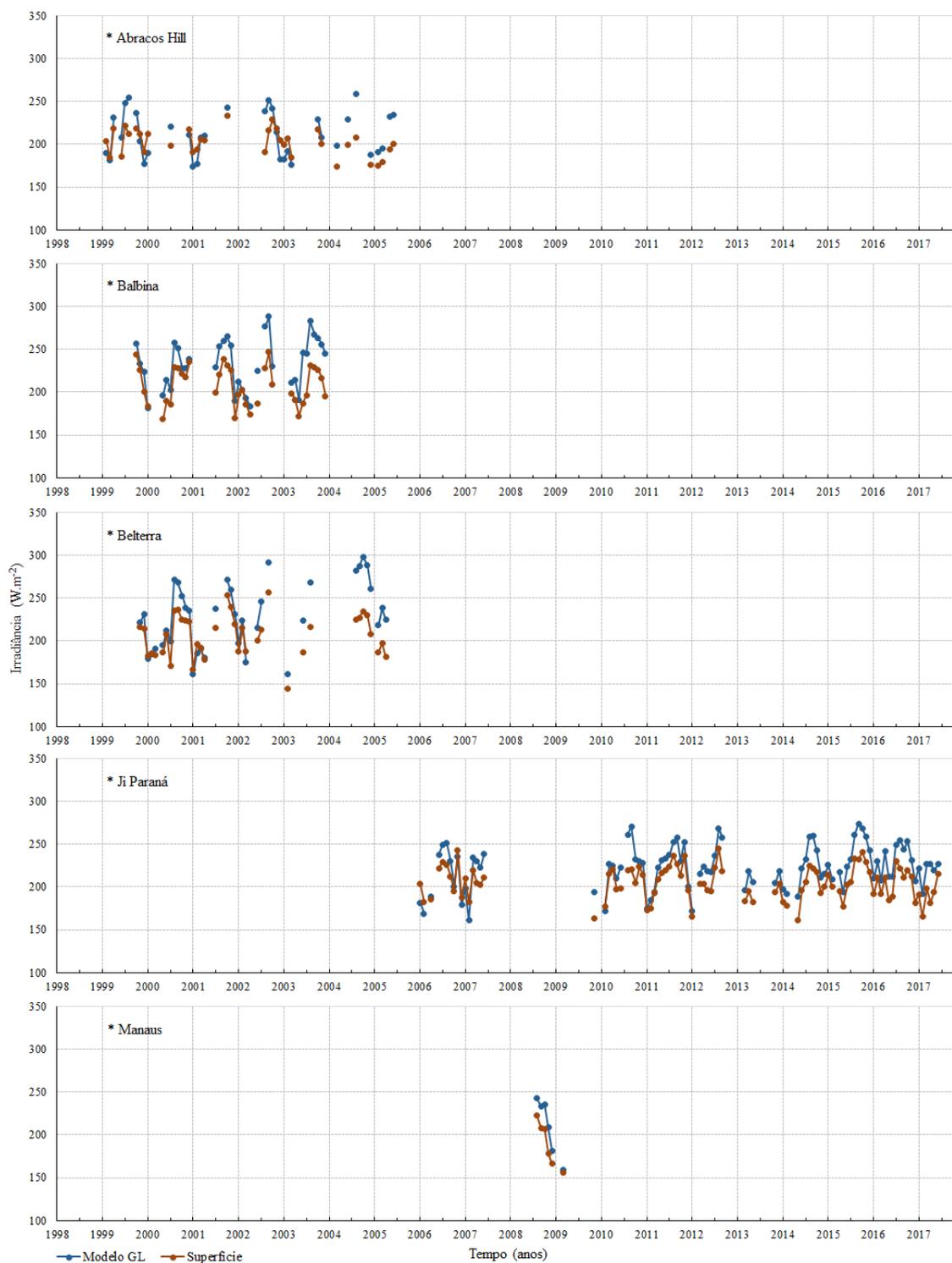


Figura A.3. Resultados adicionais de comparações, séries temporais, SNHT e composições da base histórica.



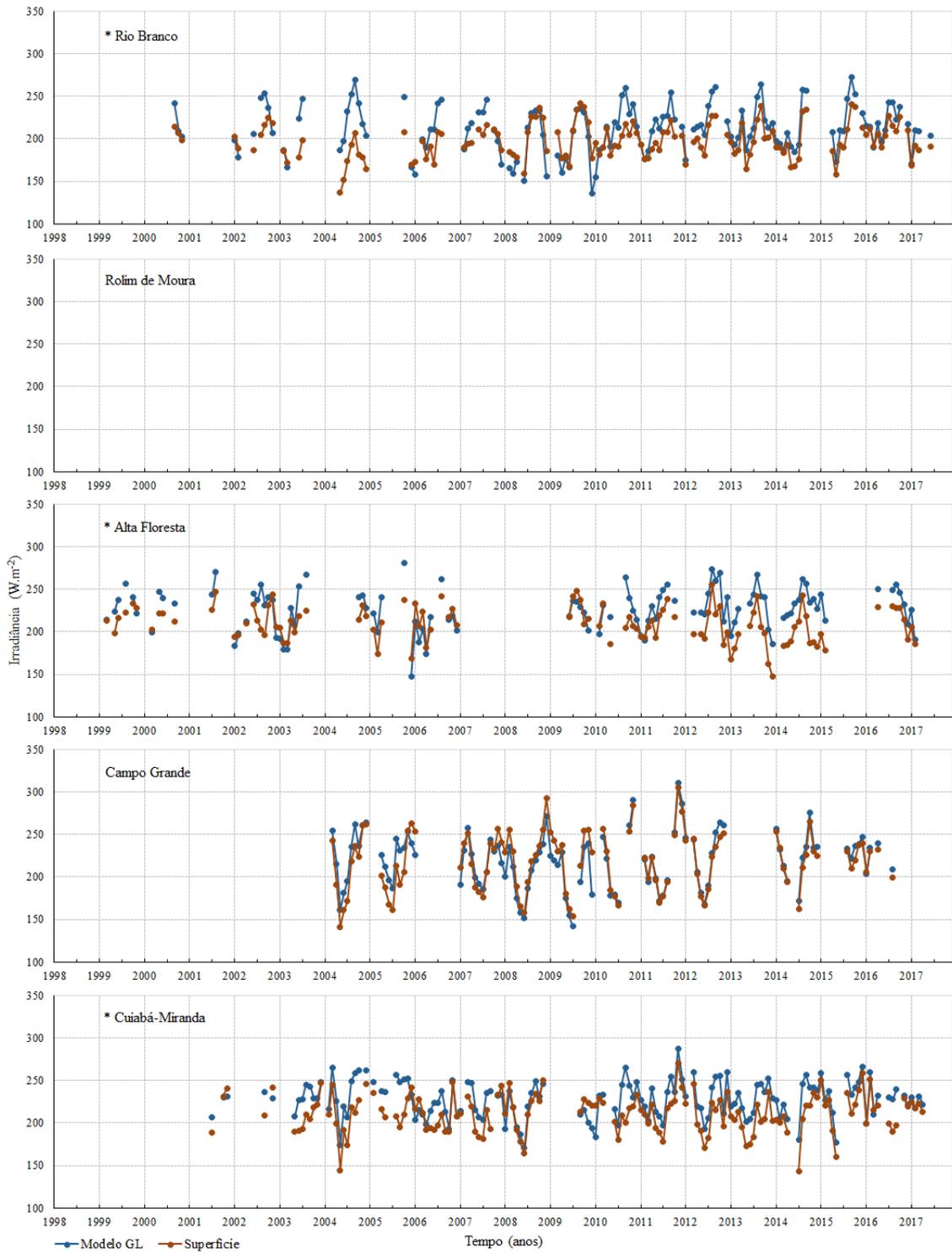
(continua)

Figura A.3. Continuação.



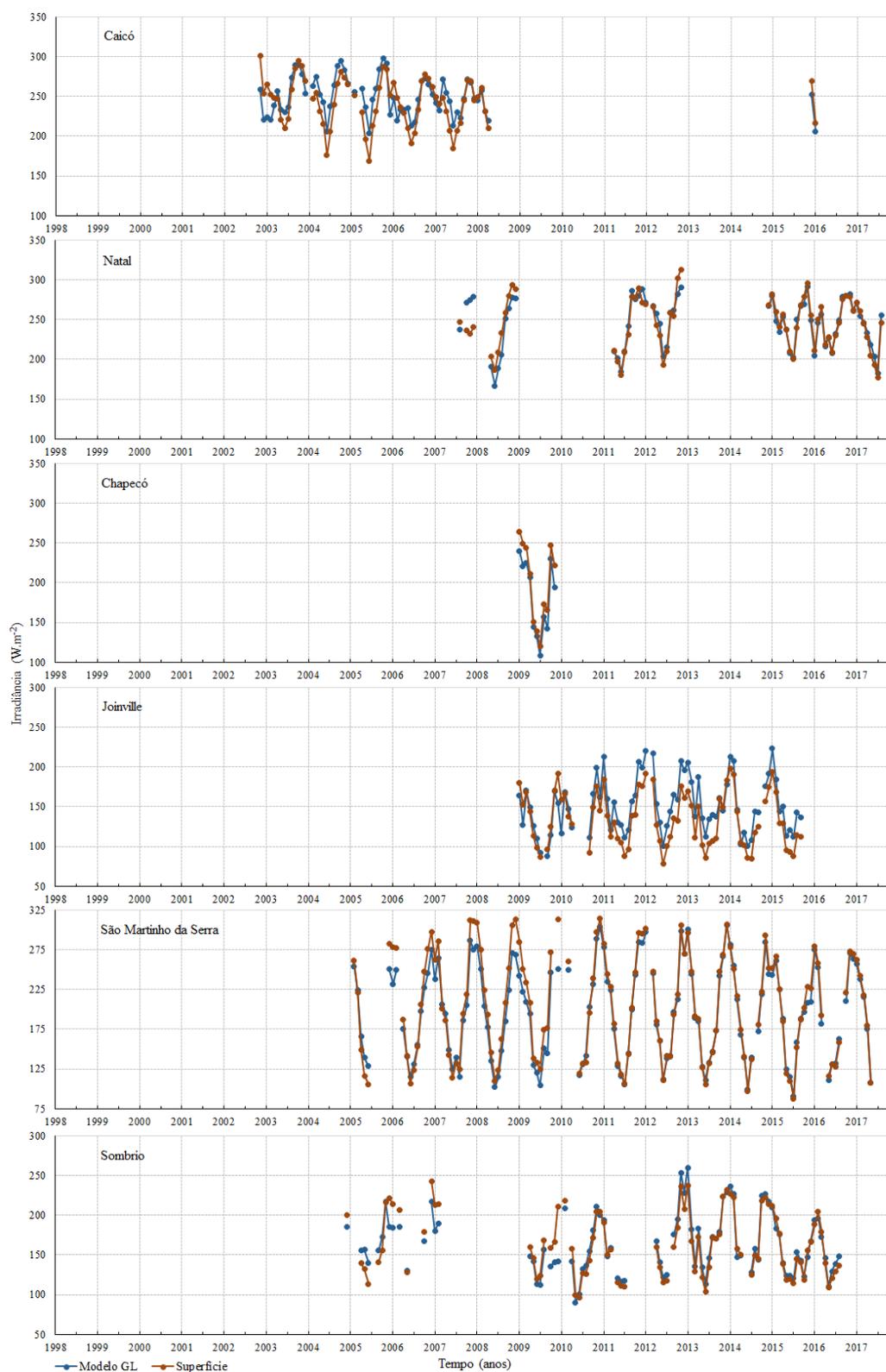
(continua)

Figura A.3. Continuação.



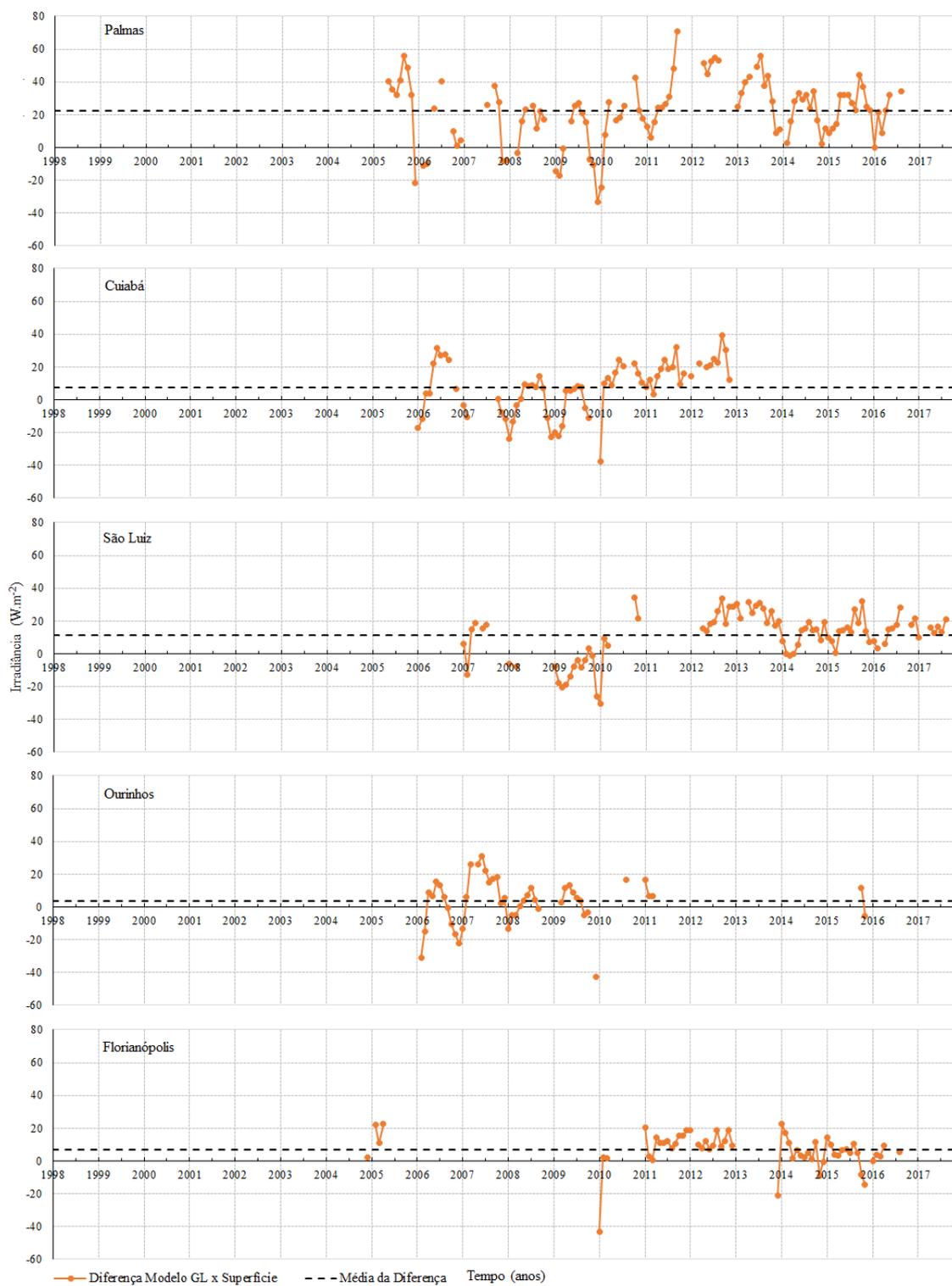
(continua)

Figura A.3. Continuação.



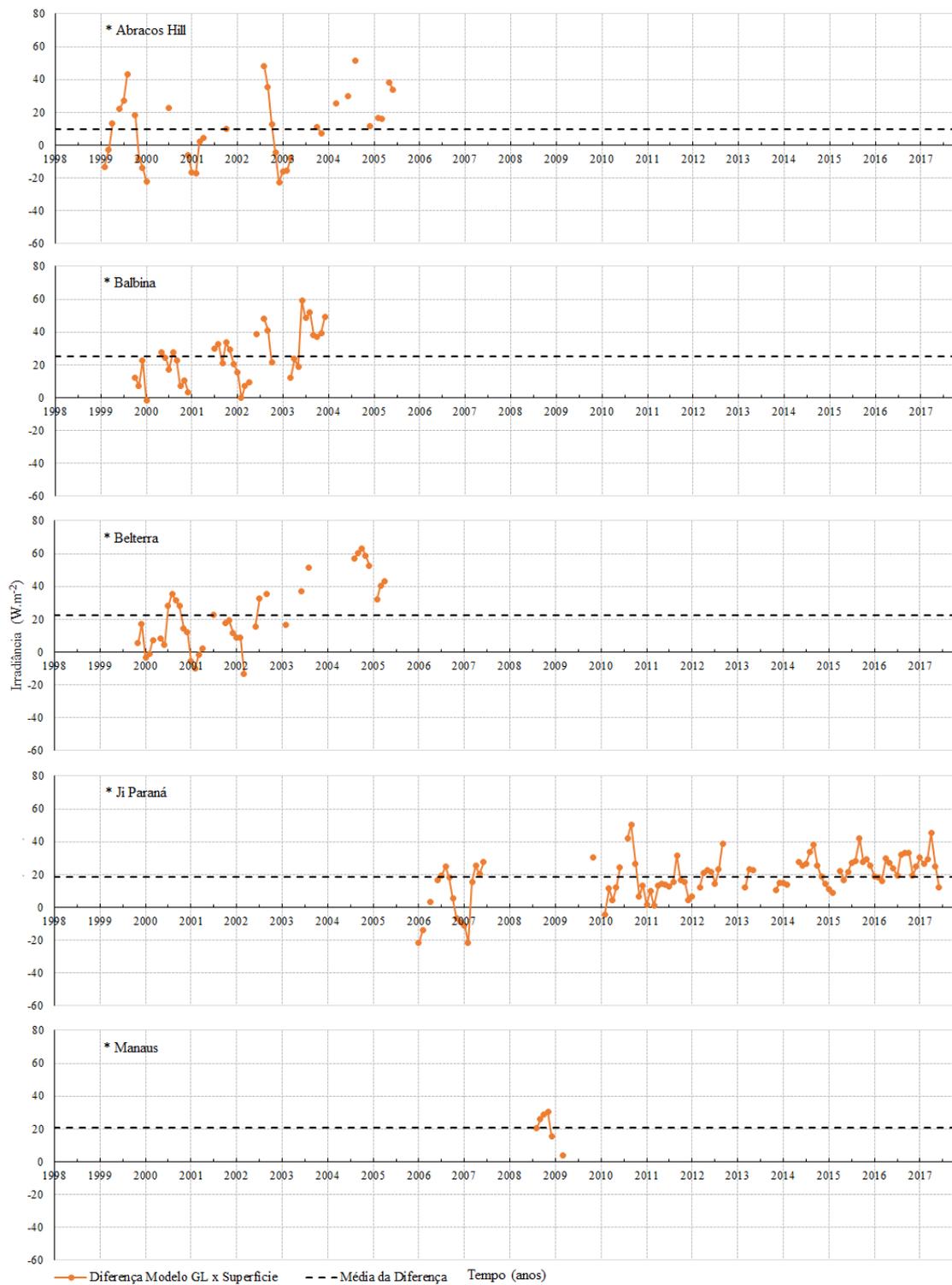
(continua)

Figura A.3. Continuação.



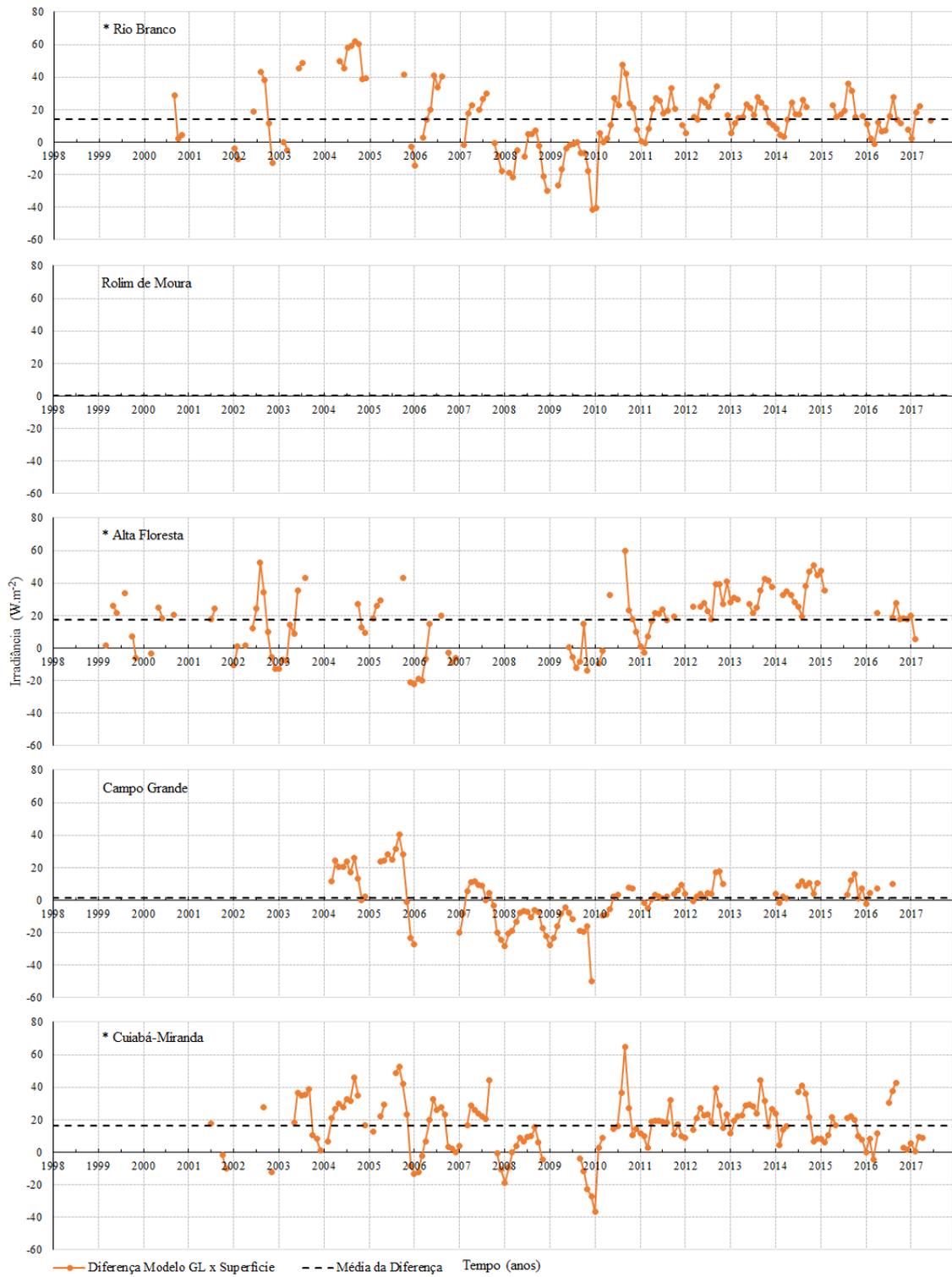
(continua)

Figura A.3. Continuação.



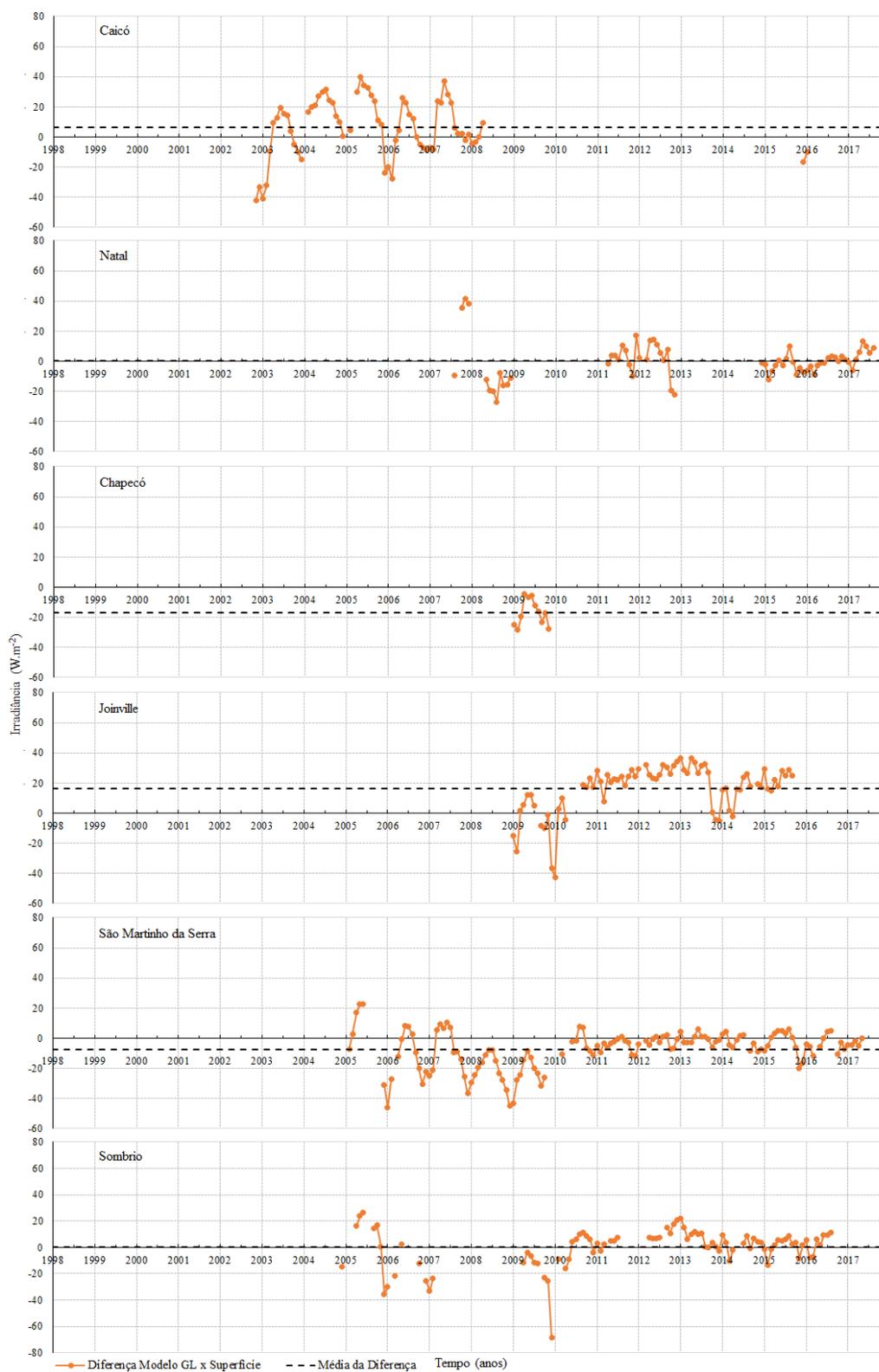
(continua)

Figura A.3. Continuação.



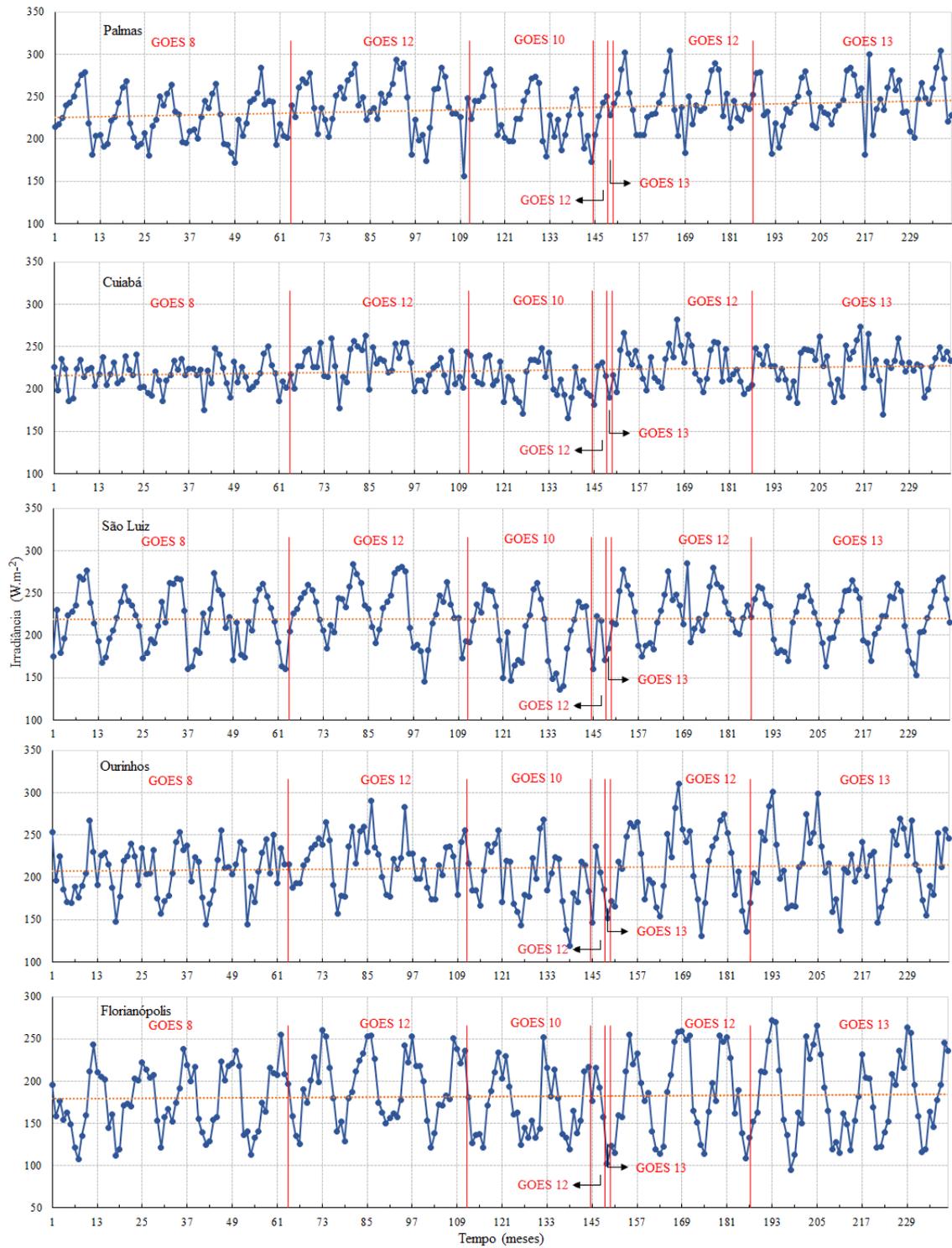
(continua)

Figura A.3. Continuação.



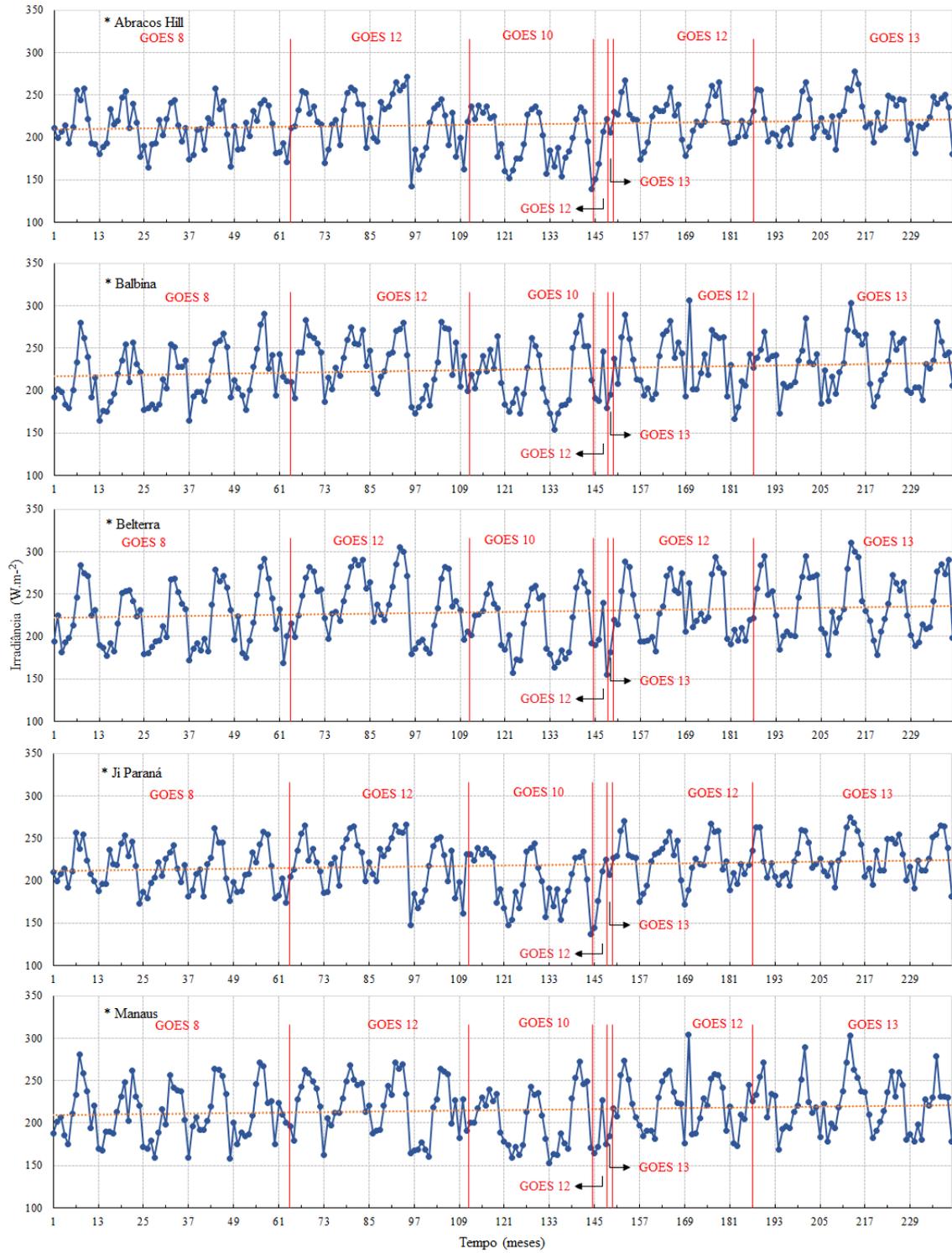
(continua)

Figura A.3. Continuação.



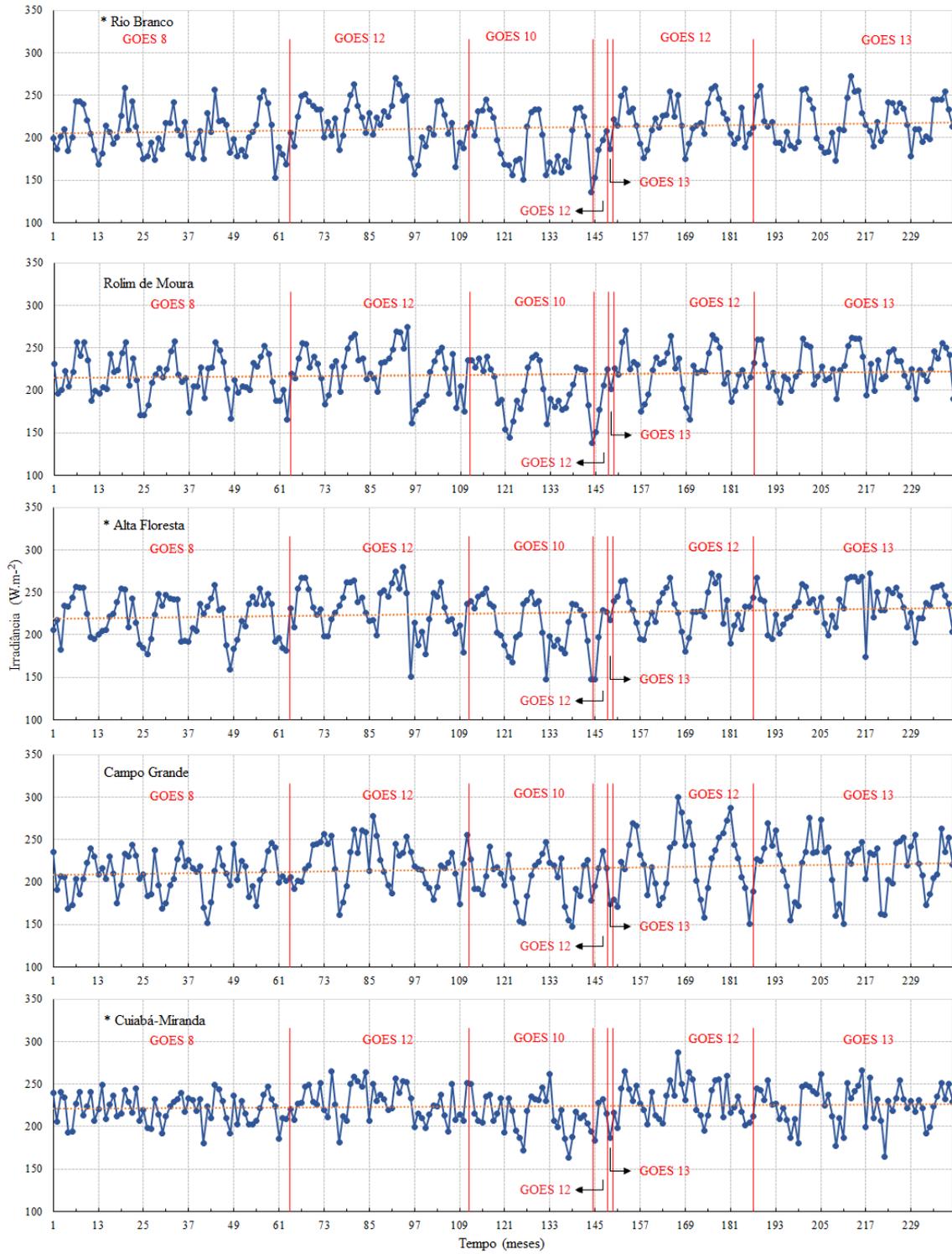
(continua)

Figura A.3. Continuação.



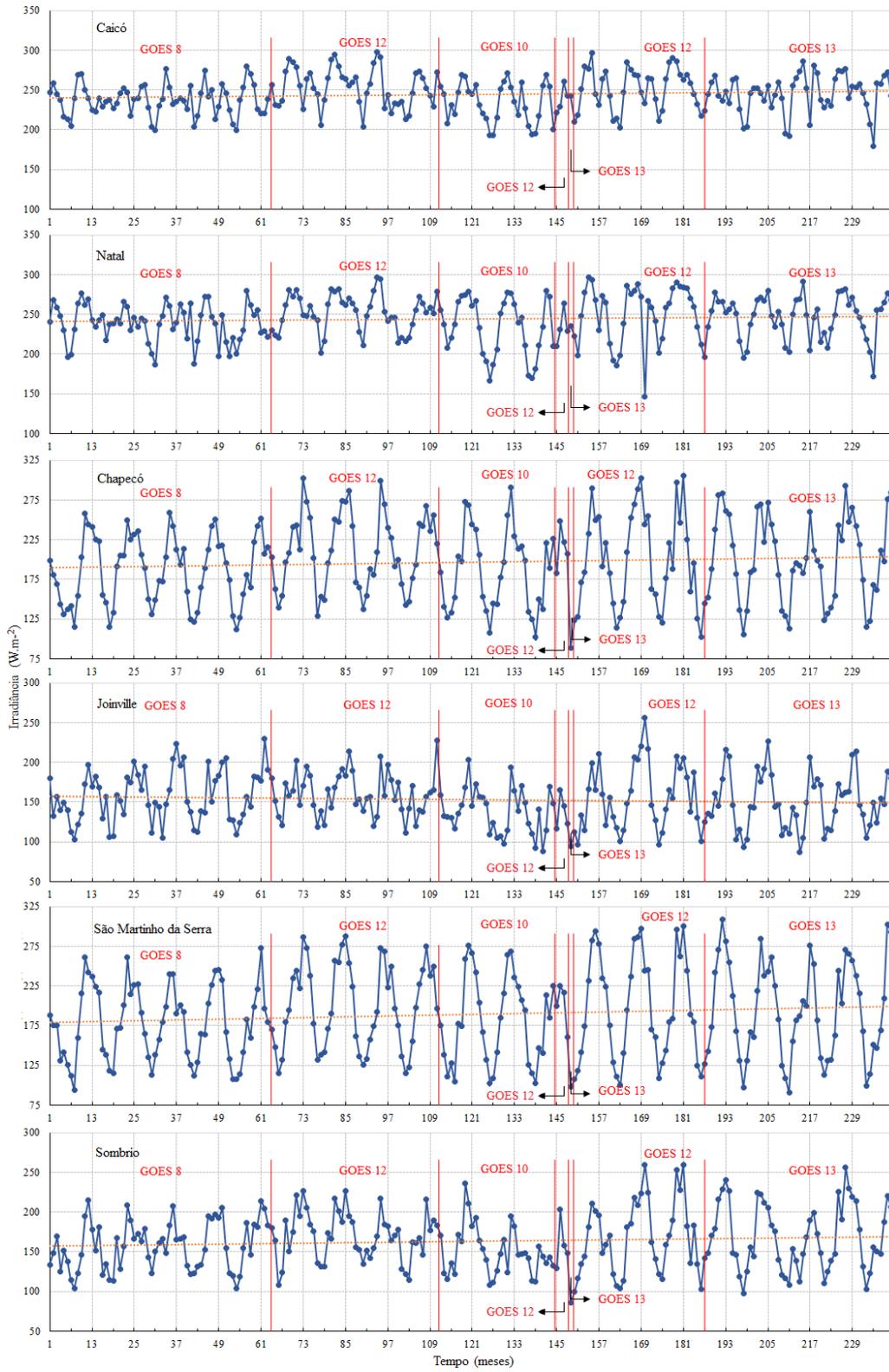
(continua)

Figura A.3. Continuação.



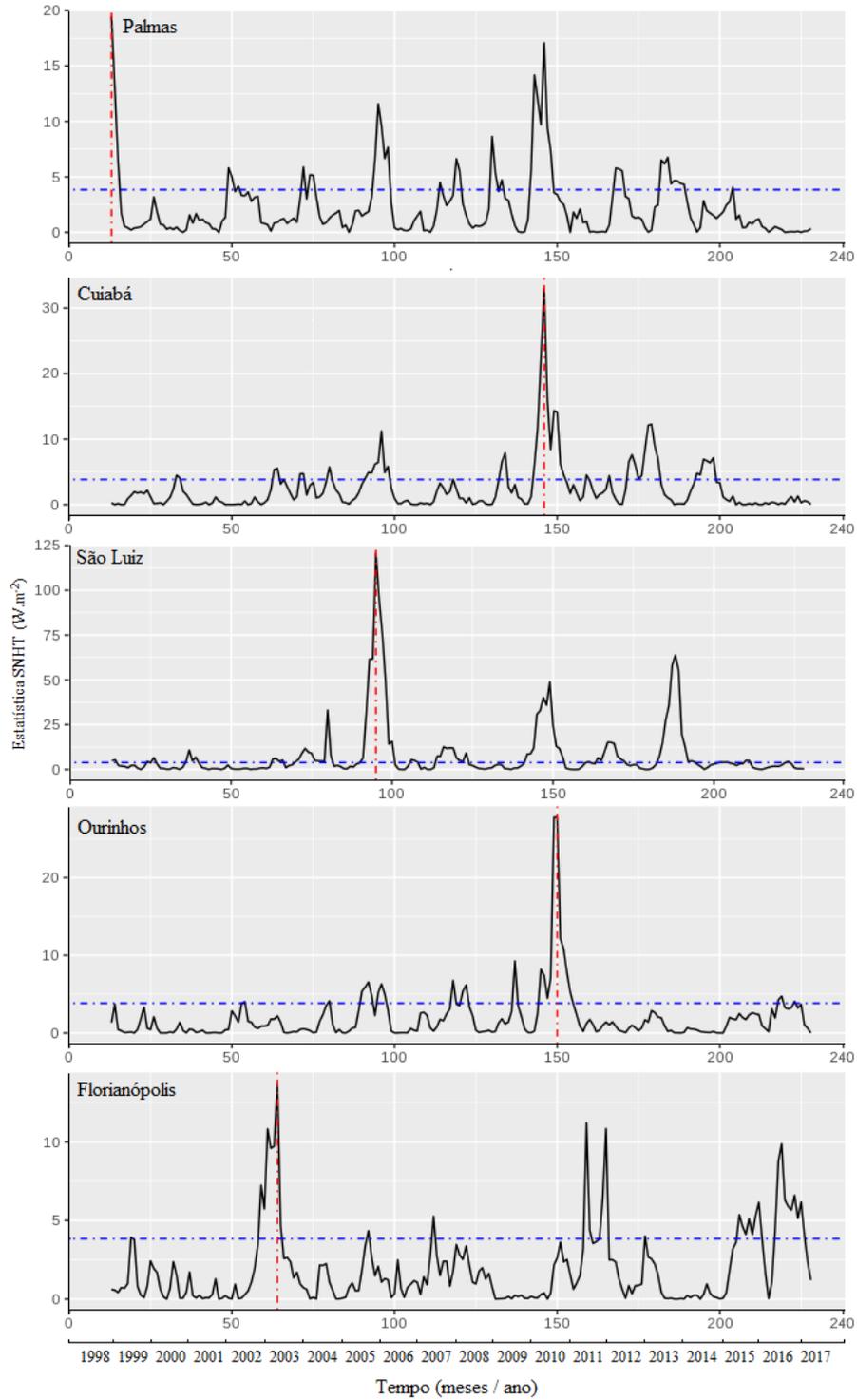
(continua)

Figura A.3. Continuação.



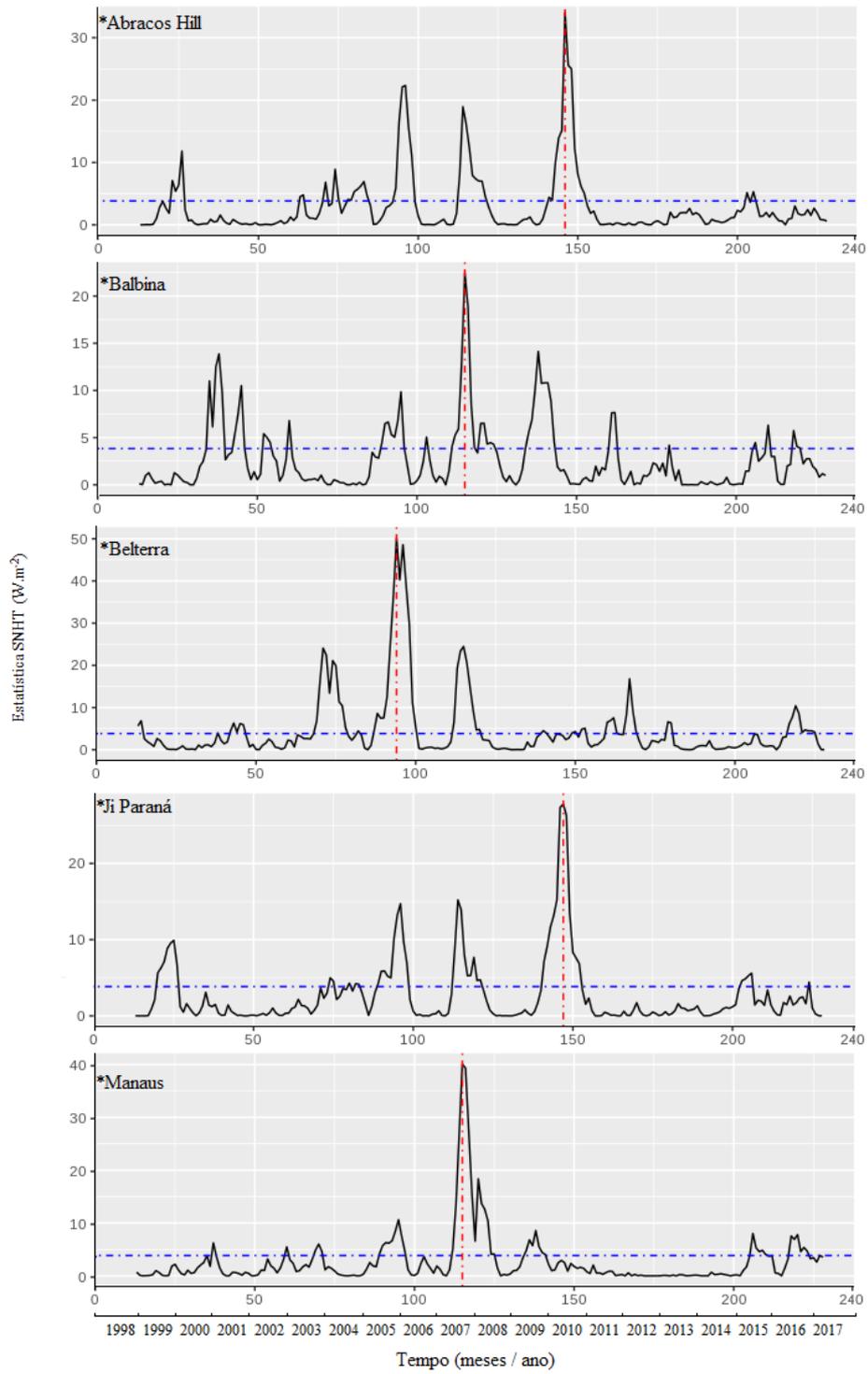
(continua)

Figura A.3. Continuação.



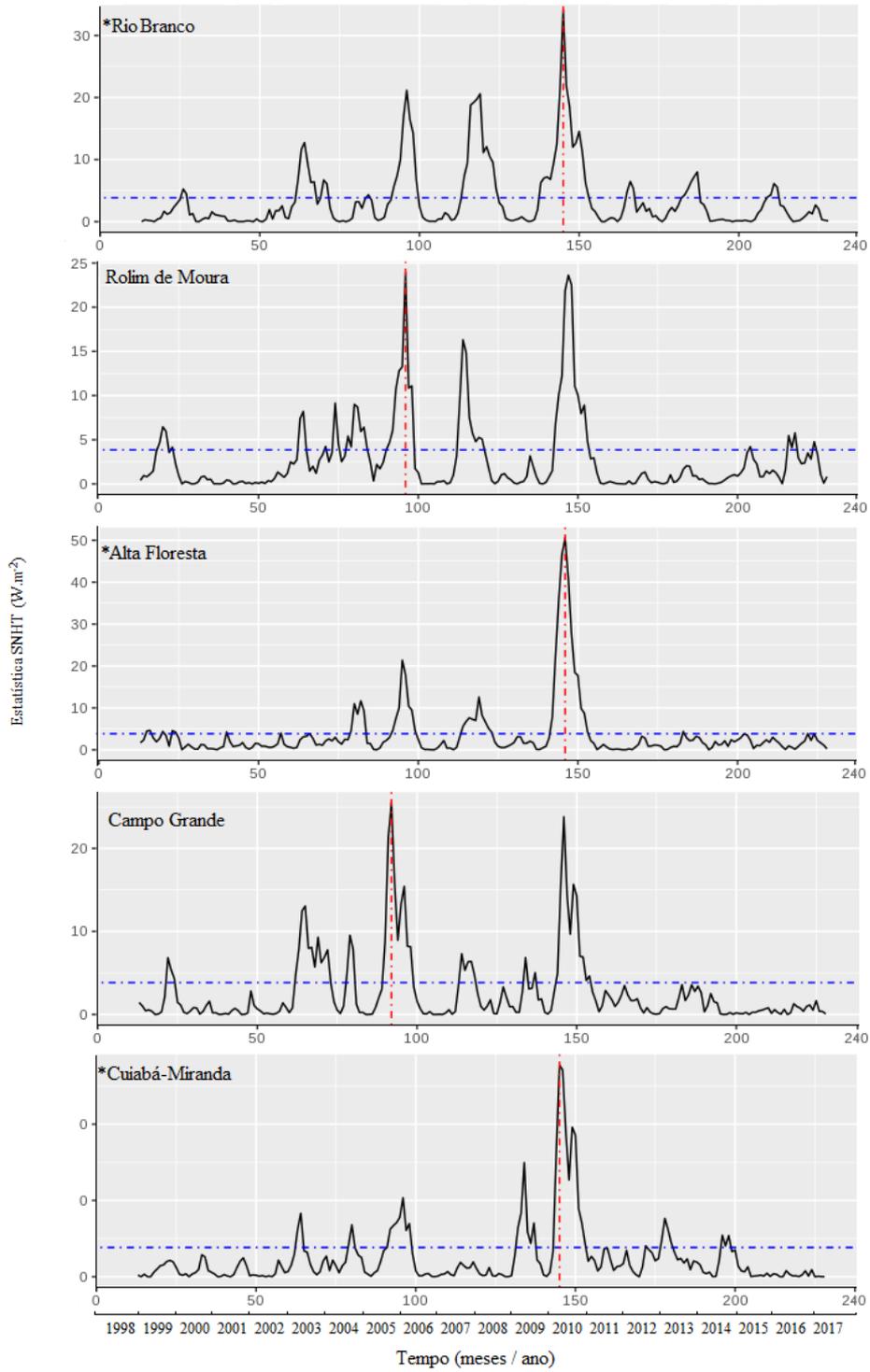
(continua)

Figura A.3. Continuação.



(continua)

Figura A.3. Continuação.



(continua)

Figura A.3. Conclusão.

