

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL  
UNIDADE DE NOVO HAMBURGO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA EM ENERGIA

RAIANA SCHIRMER SOARES

**ELABORAÇÃO DE MAPAS SOLARIMÉTRICOS PARA O ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL POR MEIO DO TRATAMENTO E DA INTERPOLAÇÃO DE  
DADOS ORIUNDOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS**

NOVO HAMBURGO

2017

RAIANA SCHIRMER SOARES

**ELABORAÇÃO DE MAPAS SOLARIMÉTRICOS PARA O ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL POR MEIO DO TRATAMENTO E DA INTERPOLAÇÃO DE  
DADOS ORIUNDOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia em Energia na Universidade  
Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Haag

Novo Hamburgo

2017

RAIANA SCHIRMER SOARES

**ELABORAÇÃO DE MAPAS SOLARIMÉTRICOS PARA O ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL POR MEIO DO TRATAMENTO E DA INTERPOLAÇÃO DE  
DADOS ORIUNDOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia em Energia na Universidade  
Estadual do Rio Grande do Sul.

Aprovado em: / /

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Claudinéia Brazil Saldanha – Faculdade Dom Bosco

---

Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Rafael Haag – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram no decorrer desse processo de criação. Sobretudo, agradeço à minha família pela compreensão no que diz respeito à minha ausência; ao Matheus, por se fazer presente durante este período; à Georgia, por ter sido a amiga e companheira ideal no processo de tratamento dos dados; e ao meu orientador Rafael, por ter me confiado este projeto, pela paciência e, sobretudo, por me inspirar academicamente.

Finalmente, agradeço à UERGS pela concessão de bolsa de pesquisa para a realização do projeto e, principalmente, por se fazer sólida em um momento de liquidez política e se manter resoluta enquanto um ambiente emancipador de ensino.

## RESUMO

O investimento em tecnologias de conversão da energia solar é de suma importância para os países em desenvolvimento, haja vista que responde diretamente às expectativas do desenvolvimento sustentável, por meio da promoção de empregos diretos e indiretos, do auxílio na diversificação da matriz energética e pelo fato de tornar mais limpa e menos dependente de fontes fósseis. Por essa razão, a produção científica que vise fomentar o investimento nessas tecnologias é também imprescindível para países como o Brasil. Sob a luz dessa motivação, o presente projeto tem como objetivo a geração de mapas solarimétricos de médias diárias mensais, sazonais e anual de radiação global horizontal para o estado do Rio Grande do Sul por meio de dados oriundos de 38 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dispersas no estado. Para atingir tal objetivo, fez-se necessário o tratamento dos dados de todas as estações com a finalidade de que fossem verificados eventuais erros. Uma vez tratados, para todas as estações, foram gerados o dia médio de todos os meses de medição e, através dele, a média diária anual, sazonal e mensal para as estações. Por razões das séries temporais não serem longas o bastante e em razão de insuficiência de dados válidos, somente 34 estações foram empregadas na elaboração dos mapas. Optou-se pela interpolação krigagem default do software ArcGIS para a estimativa dos valores de radiação para todos os demais pontos no mapa. A média diária anual mínima foi de 4,36 kWh/m<sup>2</sup>/dia; a máxima, 5,01 kWh/m<sup>2</sup>/dia; e a média, 4,67 kWh/m<sup>2</sup>/dia. Através da avaliação dos erros associados à estimativa dos mapas, concluiu-se que os mesmos apresentam uma boa representação do fenômeno. Finalmente, ao serem comparados com os mapas elaborados pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar, concluiu-se que, apesar dos mesmos ilustrarem comportamentos semelhantes, os mapas gerados pelo presente projeto apresentam valores mais baixos.

Palavras-Chaves: Desenvolvimento Sustentável. Radiação Solar. Mapa Solarimétrico. Krigagem.

## ABSTRACT

Investing in solar energy conversion technologies is of major importance for developing countries, once it directly responds to sustainable development's requirements through the promotion of direct and indirect jobs related to it and the support in diversifying their energy matrixes with clear energy, turning it less reliant on fossil fuels. Due to this reason, the scientific production which seeks to foster investments in such technologies is also indispensable for countries like Brazil. In respect to this, this paper aims to create solar maps illustrating the daily annual, monthly and seasonal global radiations average in the state of Rio Grande do Sul (BR) by means of data collected within 38 stations from the National Meteorology Institution. In order to reach such objective, it was necessary to verify all data provided and to correct all eventual mistakes related to it. Once all data was verified and treated, the typical daily average for each month of the time-series of each station was obtained and, thus, the daily annual, monthly and seasonal global radiations average for each station. Due to the fact that some stations did not offer long enough time-series with validated data, only 34 stations were employed in the confection of the maps. Default Kriging interpolation in ArcGIS was the chosen method to predict all the other points within the limits of the state. The minimum daily annual global radiation average obtained for the whole state was 4,36 kWh/m<sup>2</sup>/day; the maximum, 5,01 kWh/m<sup>2</sup>/day; and the average, 4,67 kWh/m<sup>2</sup>/day. Through the evaluation of the errors associated with the modeling of the maps, it was concluded that they offer a satisfying representation of global radiation phenomenon. Finally, by being compared to the maps of Brazilian Atlas of Solar Energy, it was observed that, although they illustrate similar behaviors, the maps created by this paper present lower values.

Keywords: Sustainable Development. Solar Radiation. Solar Map. Kriging.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quantidade de Conexões e Potência Instalada de GD nos estados.....	13
Figura 2 – Evolução da quantidade de conexões e potência instalada no estado.....	14
Figura 3 – Fontes de Energia (GD no RS) .....	15
Figura 4 – Classes (GD no RS) .....	15
Figura 5 – Dispersão das instalações de micro e minigeração distribuída no estado.....	16
Figura 6 – Potência instalada das instalações de micro e minigeração no estado.....	16
Figura 7 – Mapa solarimétrico gerado por meio dos dados do IPAGRO .....	19
Figura 8 – Mapa da média anual típica de radiação do Atlas de Irradiação Solar do Brasil....	20
Figura 9 – Mapa da Radiação solar global diária do Atlas Solarimétrico do Brasil .....	20
Figura 10 – Mapa de radiação solar global diária, média anual elaborado por MARTINAZZO .....	21
Figura 11 – Mapa da média anual de radiação global horizontal do Atlas Brasileiro de Energia Solar.....	22
Figura 12 – Estações do INMET cujos dados foram disponibilizados.....	27
Figura 13 – Componentes da radiação global .....	28
Figura 14 – Ilustração do piranômetro Eppley PSP .....	29
Figura 15 – Ilustração da geometria da incidência de radiação.....	30
Figura 16 – Percentual de dados válidos e faltantes.....	37
Figura 17 – Exemplo de gráfico de dispersão contendo incoerências.....	38
Figura 18 – Erros encontrados no tratamento de dados da estação de Chuí .....	39
Figura 19 – Gráficos de dispersão gerados após tratamento de dados para todos os municípios .....	40
Figura 20 – Ilustração das médias de todas as estações .....	43
Figura 21 – Estações do INMET cujos dados foram empregados na confecção dos mapas....	44
Figura 22 – Média mensal de radiação global horizontal no RS.....	46
Figura 23 – Radiação solar média diária anual.....	47
Figura 24 – Radiação solar média diária sazonal (verão).....	48
Figura 25 – Radiação solar média diária sazonal (outono) .....	49
Figura 26 – Radiação solar média diária sazonal (inverno) .....	50
Figura 27 – Radiação solar média diária sazonal (primavera) .....	51
Figura 28 – Radiação solar média diária mensal (janeiro e fevereiro).....	52

Figura 29 – Radiação solar média diária mensal (março e abril) .....	53
Figura 30 – Radiação solar média diária mensal (maio e junho) .....	54
Figura 31 – Radiação solar média diária mensal (julho e agosto).....	55
Figura 32 – Radiação solar média diária mensal (setembro e outubro) .....	56
Figura 33 – Radiação solar média diária mensal (novembro e dezembro) .....	57
Figura 34 – Mapas do desvio padrão das estimativas (prediction standard error maps)(médias diárias anual e sazonais) .....	59
Figura 35 – Exemplo de obtenção do mapa via krigagem .....	60
Figura 36 – Comparação dos mapas referentes à média diária anual de radiação solar. Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE .....	61
Figura 37 – Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (verão) Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE .....	61
Figura 38 – Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (outono) Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE .....	62
Figura 39 – Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (inverno) Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE .....	62
Figura 40 - Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (primavera) Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE .....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Alterações na elaboração das médias.....	41
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Anos de medição das estações .....	35
Tabela 2 – Médias diárias mensais, sazonais e anuais para cada município estudado.....	42
Tabela 3 – Radiação mensal, sazonal e anual (mínima, máxima e média) do estado .....	45
Tabela 4 – Erros associados à interpolação .....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Objetivo geral .....	12
1.2 Objetivos específicos .....	12
<b>2 ENERGIA SOLAR NO RIO GRANDE DO SUL .....</b>	<b>13</b>
<b>3 MAPAS SOLARIMÉTRICOS.....</b>	<b>18</b>
3.1 Histórico nacional.....	18
3.2 Variações metodológicas .....	22
3.3 Modelo Interpolador Estocástico (Krigagem) .....	24
<b>4 DADOS DE RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL .....</b>	<b>27</b>
4.1 Radiação Global Horizontal .....	28
4.2 Instrumentos utilizados na coleta dos dados de radiação global .....	29
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
5.1 Tratamento dos Dados .....	32
5.2 Obtenção das médias de irradiação global horizontal .....	33
5.3 Interpolação dos dados na elaboração dos mapas .....	34
<b>6 RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
6.1 Tratamento dos Dados .....	35
6.1.1 Verificação das datas nas séries temporais.....	36
6.1.2 Preenchimento dos dados Faltantes e Verificação de Incoerências .....	36
6.2 Obtenção das médias de irradiação global horizontal .....	41
6.3 Interpolação dos dados e elaboração dos mapas .....	44
6.4. Comparação com o Atlas Brasileiro de Energia Solar .....	60
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>8 FUTUROS PROJETOS.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em decorrência das mudanças climáticas, da escassez ou finitude de matérias-primas energéticas, do crescente aumento da demanda energética e do compromisso para com as gerações futuras, o fomento às fontes de energia alternativas e renováveis vem sendo pautado cada dia mais em todo mundo enquanto um dos pilares para o desenvolvimento sustentável. Prova disso é que (em setembro de 2015) 193 países, incluindo o Brasil, comprometeram-se com os *Sustainable Development Goals*, cujo objetivo é de erradicar a pobreza e proteger o planeta em busca da sustentabilidade. Dentre as dezessete metas propostas, uma delas prega o acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna por parte de todos. Haja vista que a energia solar é, além de ambientalmente vantajosa em relação a qualquer outra fonte de energia, o elemento fundamental para qualquer programa de desenvolvimento (DINÇER, 2011), o presente projeto parte da premissa de que o fomento à conversão de energia solar para fins de redução de consumo ou geração de energia elétrica são imprescindíveis para que o Brasil corresponda às expectativas internacionais relacionadas ao seu desenvolvimento.

A geração de energia limpa contribui para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa. Levando-se em consideração que de 1971 a 2004 o total de gases emitidos relacionados ao uso de energia cresceu 65% no mundo (PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011); e que, “na maior parte dos países, a atividade econômica que emite a maior quantidade de CO<sub>2</sub> é a geração de energia elétrica” (DINÇER, 2011, p. 714, tradução nossa), é visível a necessidade de que o modelo de geração de energia elétrica mundial seja repensado em prol da manutenção e preservação dos recursos naturais. Ademais, os recursos fósseis, responsáveis em 2014 por 66,7% da geração de energia elétrica mundial (IEA, 2016), são finitos; e seu uso extensivo põe em risco, portanto, a segurança energética mundial. No Brasil, no entanto, de acordo com o Relatório Síntese da Empresa de Pesquisa Energética nacional (EPE) (2016, p. 9), os índices de emissão de poluentes relacionados à energia elétrica são baixos quando comparados à média mundial, tendo sido de 139,6 kg CO<sub>2</sub> para cada 1MWh produzido em 2015. Tal efeito decorre do fato de que a energia hidráulica fora responsável no mesmo ano (um ano atípico por conta de uma crise hídrica) por 64% da geração de energia elétrica nacional, mantendo a matriz elétrica brasileira como parâmetro internacional no que se relaciona à geração de energia elétrica limpa.

Apesar de considerável avanço da energia eólica e da biomassa em nossa matriz elétrica – juntas, representando uma parcela 11,5% em 2015 –, a energia solar fora responsável por

apenas 0,01% da geração de energia elétrica no mesmo ano. E, apesar do Brasil possuir uma matriz elétrica preponderantemente limpa, políticas públicas de desenvolvimento sustentável, para além das questões ambientais, respondem aos interesses econômicos e sociais em igual importância. Socialmente, as energias renováveis – com exceção da hidroeletricidade, corroborando com o exposto – geram mais empregos diretos do que os combustíveis fósseis, por exemplo e, além disso, respondem às demandas e disponibilidades locais (CUNHA; PRATES, 2005). Em um país com as dimensões do Brasil, portanto, o fomento à geração de energia solar é estrategicamente viável, haja vista que complementa a geração hídrica sazonal e fomenta um mercado em recente ascensão, justificando os investimentos no setor.

### 1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a elaboração de mapas solarimétricos sazonais, mensais e anual para o estado do Rio Grande do Sul através da metodologia de interpolação dos dados de radiação global horizontal de 38 estações meteorológicas dispostas no estado.

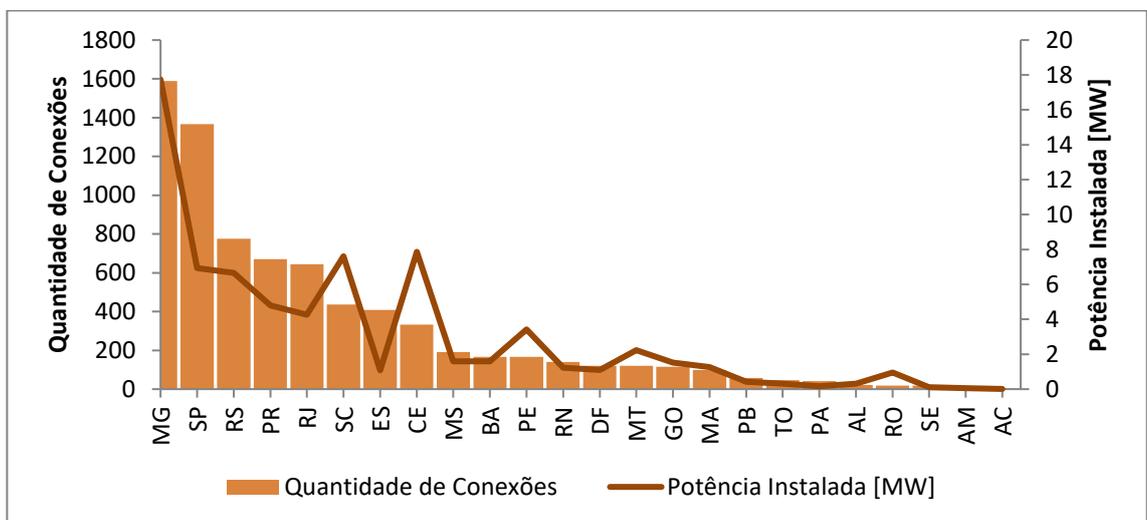
### 1.2 Objetivos específicos

- Tratamento de todas as séries temporais das estações de medição: verificação de incoerências e de dados faltantes e adoção de medidas corretivas;
- Elaboração das médias diárias mensais, médias diárias sazonais e média diária anual de radiação global horizontal para cada estação de medição;
- Comparação dos mapas obtidos com aqueles ilustrados no Atlas Brasileiro de Energia Solar;
- Disponibilização dos dados tratados para futuras pesquisas.

## 2 ENERGIA SOLAR NO RIO GRANDE DO SUL

De acordo com o Balanço Energético do Rio Grande do Sul de 2015 referente ao ano de 2014, o “uso da energia solar fotovoltaica é pequeno no RS em virtude do ainda elevado custo de implantação dos painéis de captação” (CAPELETTO e ZANCHI, 2015, p. 61). No entanto, desde a publicação da Resolução Normativa 482 da ANEEL (doravante, REN.482), que “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica [e] o sistema de compensação de energia elétrica” (ANEEL, 2012, p. 1), o Rio Grande do Sul vem apresentando papel de destaque no setor. Tal afirmação pode ser constatada através da Figura 1, que ilustra uma comparação entre o número de conexões e a potência instalada em cada estado brasileiro até o fim de 2016, posicionando o RS em terceiro lugar em relação à quantidade de instalações e em quinto lugar em relação à potência instalada até a data.

Figura 1 – Quantidade de Conexões e Potência Instalada de GD nos estados



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

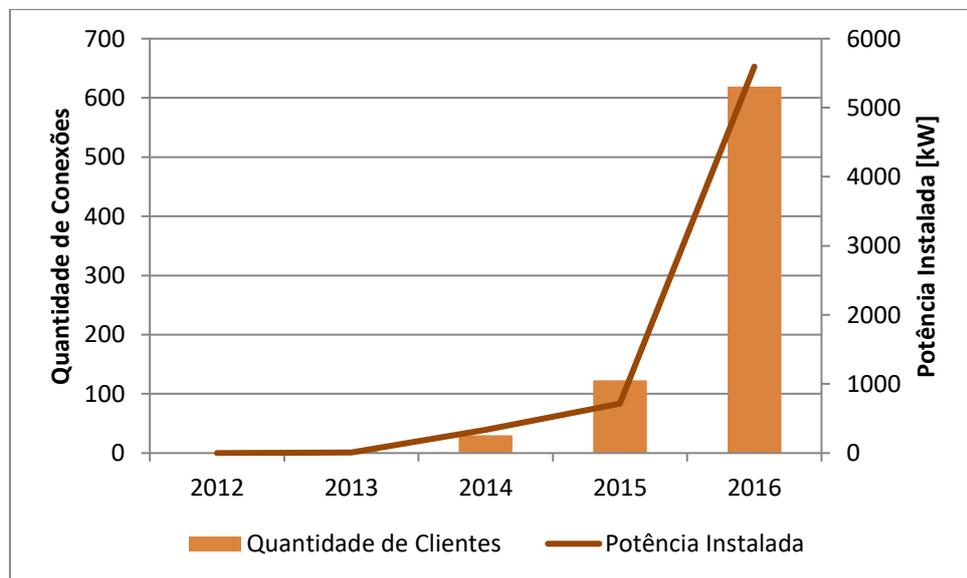
Ao contrário da Alemanha, Japão, Espanha e Estados Unidos, por exemplo, o Brasil não adotou medidas de fomento à geração distribuída tais como o *feed-in-tariff*<sup>1</sup>, que resultam na expansão da manufatura tecnológica, na redução de seus custos e, portanto, na consolidação do setor (DINÇER, 2010). Tampouco passou a remunerar os geradores autônomos em sua rede de

<sup>1</sup> Com a finalidade de encorajar os consumidores a gerar energia descentralizada, trata-se de uma tarifa paga ao cliente por kWh gerado.

distribuição; a REN.482 definiu o conceito de Sistema de Compensação de Energia Elétrica como sendo “[um] sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa” (ANEEL, 2012, pg. 2).<sup>2</sup>

Apesar disso, conforme ilustrado na Figura 2, desde seu reconhecimento, a geração distribuída passou a ter um prognóstico positivo no estado, que finalizou o ano de 2016 com mais de 5 MW instalados através da implementação descentralizada de painéis fotovoltaicos.

Figura 2 – Evolução da quantidade de conexões e potência instalada no estado

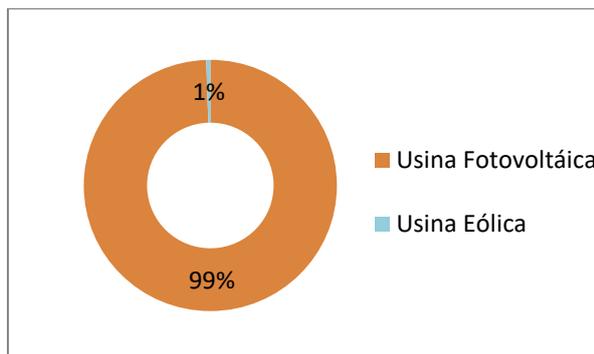


Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

Além disso, apesar da geração distribuída ser aplicável às demais fontes de energia renováveis e à cogeração qualificada, tanto no Brasil quanto no estado, conforme indica a Figura 3, as instalações fotovoltaicas são as grandes responsáveis pelo seu avanço (99% das instalações de geração distribuída no estado são instalações fotovoltaicas). Além disso, a classe que mais investiu no setor foi a residencial, seguida pela industrial, representando, respectivamente, 77% e 20%, conforme ilustrado na Figura 4.

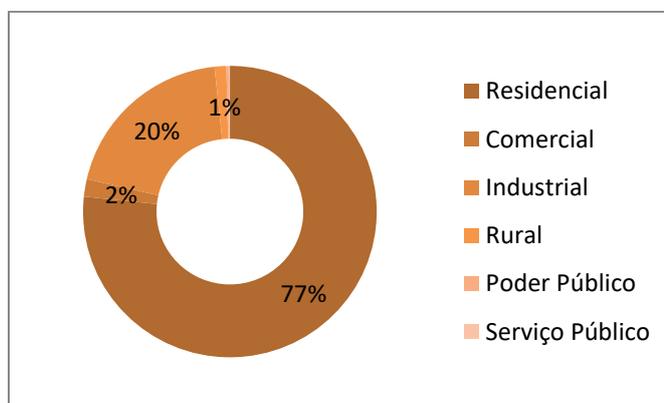
<sup>2</sup> De acordo com a Resolução Normativa 687, que readaptou a REN.482, microgeração distribuída é definida como uma “central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Em seguida, a Resolução define a minigeração distribuída como uma “central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras” (ANEEL, 2012, p.2).

Figura 3 – Fontes de Energia (GD no RS)



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

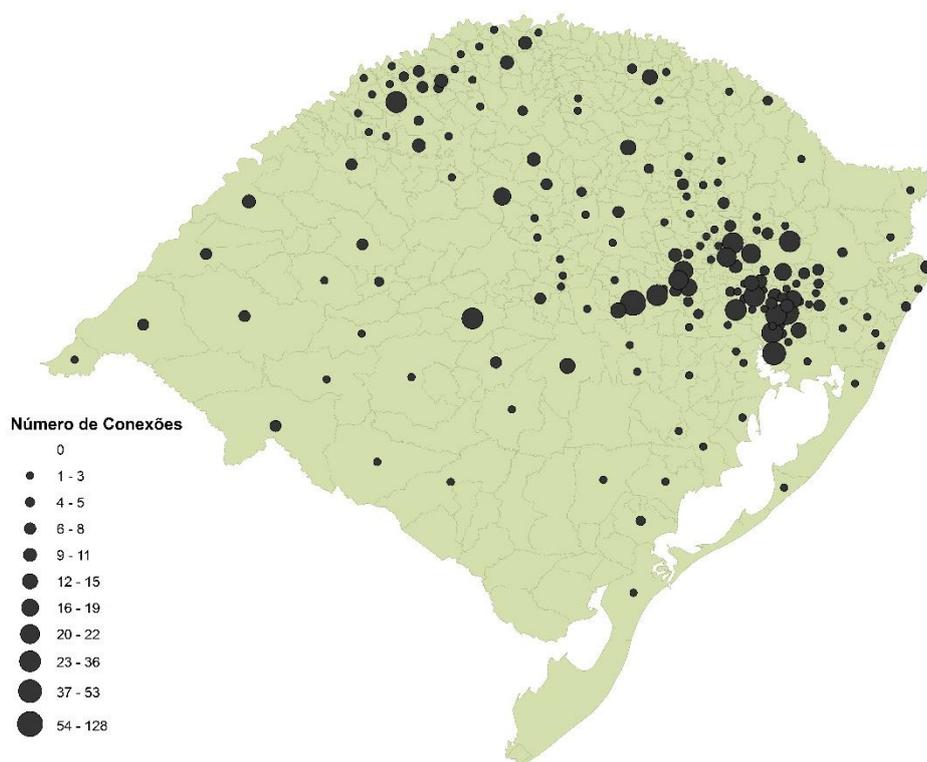
Figura 4 – Classes (GD no RS)



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

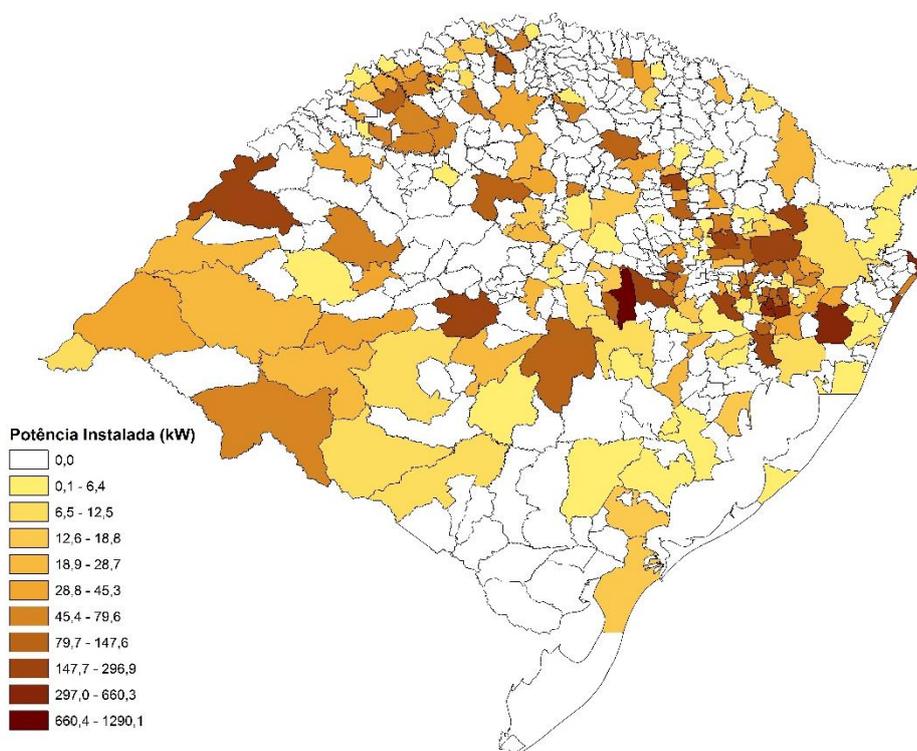
Com o intuito de ilustrar geograficamente no estado o avanço da geração distribuída, através dos dados disponibilizados no site da ANEEL atualizados até o mês de abril de 2017, foram gerados os mapas ilustrados na Figuras 5 e na Figura 6. A Figura 5 ilustra o número de conexões por município no estado. Depreende-se da mesma que o maior avanço se deu na região metropolitana, apesar do município com maior número de instalações ser Santa Cruz do Sul. A Figura 6, por sua vez, ilustra a potência instalada de mini e microgeradores por município do estado e, através de sua comparação com a Figura 5, é possível verificar que os municípios com maior número de conexões não necessariamente são aqueles com maior potência instalada, uma vez que instalações de geração distribuída podem ter potência instalada de até 5 MW (e, no entanto, a média de potência instalada por unidade consumidora no Rio Grande do Sul, de acordo com a última atualização da ANEEL (abril de 2017), é de 9,5 kW).

Figura 5 – Dispersão das instalações de micro e minigeração distribuída no estado



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

Figura 6 – Potência instalada das instalações de micro e minigeração no estado



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

Portanto, ainda que o cenário não seja o mais motivador, decorre de tais constatações que o Rio Grande do Sul reúne as condições requeridas para o estabelecimento de um mercado relacionado à energia solar, seja através do estabelecimento de empresas de manufatura de produtos de alto valor agregado, ou de prestadores de serviço. Tal pressuposto sustenta e justifica a elaboração do presente projeto, uma vez que, identificada a ascensão de um novo modelo energético, por intermédio de mapas, o projeto promove uma ferramenta que permite a visualização de pontos com maior potencial de conversão energética para futuros investimentos.

### 3 MAPAS SOLARIMÉTRICOS

A elaboração de mapas solarimétricos é de grande importância para o desenvolvimento de uma região, uma vez que a ausência de informações sobre a radiação disponível afeta diferentes áreas ligadas ao desenvolvimento, tais como agropecuária, meteorologia, engenharia florestal, recursos hídricos e a conversão de energia solar (CEMIG, 2012). No que diz respeito à conversão de energia solar, por se tratar de um mercado em recente ascensão, qualquer investimento de médio e longo prazo vai exigir informações precisas e confiáveis acerca do recurso solar disponível, posto que tal informação está diretamente ligada ao tempo de retorno do investimento da empresa ou dos produtores independentes que o fazem (MARTINS; PEREIRA; ABREU, 2007).

A falta dessas informações pode ser entendida como uma das principais barreiras no estabelecimento de um mercado ligado à geração de energia renovável em países em desenvolvimento. Isso porque a falta de análises confiáveis quanto aos seus recursos disponíveis; a falta de medições de dados terrestres com distribuição adequada; e o limitado conhecimento das variabilidades e incertezas relacionadas à variáveis naturais são as principais barreiras para o investimento em energias renováveis (MARTINS; PEREIRA; ABREU, 2007).

Visto isso, fica clara a importância da elaboração de mapas solares para o desenvolvimento e para a consolidação de um novo cenário energético local, mais preocupado em atender às demandas sociais e o desenvolvimento de uma matriz energética mais plural e limpa.

#### 3.1 Histórico nacional

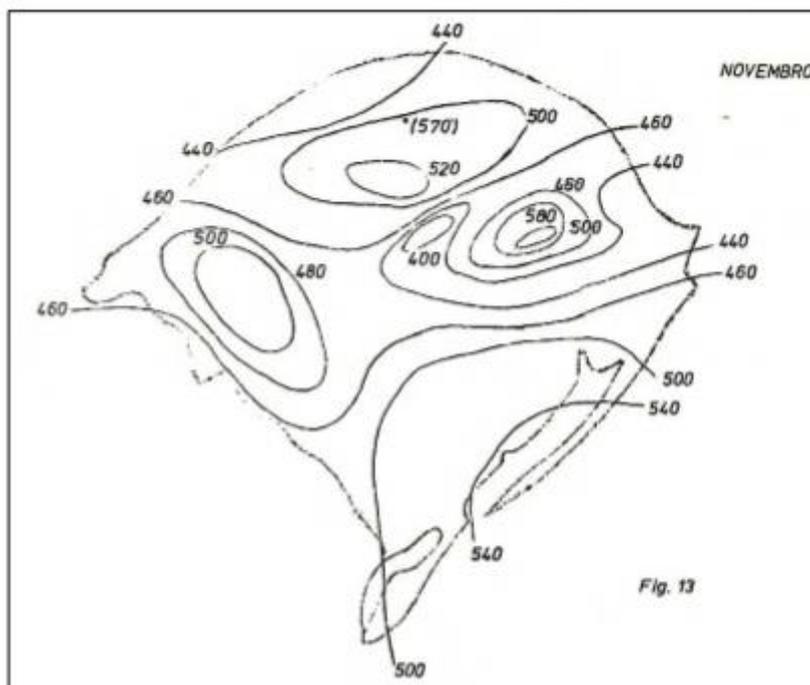
Em sua dissertação, Martinazzo (2004) revisa diferentes mapas solarimétricos gerados (e suas diferentes metodologias) que englobem ou se apliquem especificamente ao estado do Rio Grande do Sul. Entre eles, Kessler e Corbella que, em 1979, elaboraram um mapa de isolinhas a partir do tratamento de dados cedidos pelo, na ocasião, Instituto de Pesquisas Agrônomicas (IPAGRO)<sup>3</sup>. Os mapas, no entanto, não são empregados hoje como referências, uma vez que, conforme citado por Martinazzo (2004, p. 77), os autores citam diferentes fontes de erros em sua confecção, tais como os valores estimados, à calibração dos instrumentos

---

<sup>3</sup> Hoje, FEPAGRO.

utilizados e ao fato de que os dados das estações não se referem obrigatoriamente ao mesmo período.

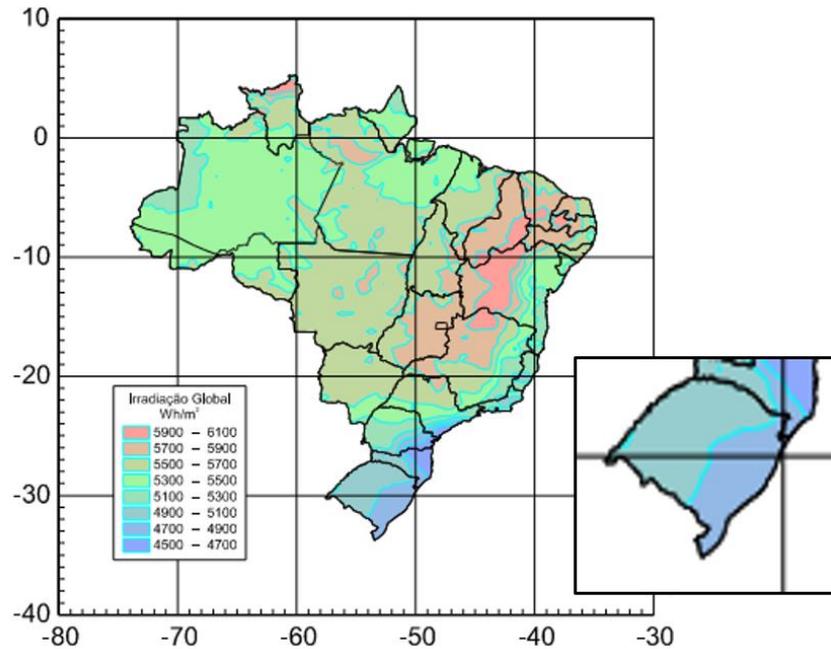
Figura 7 – Mapa solarimétrico gerado por meio dos dados do IPAGRO



Fonte: MARTINAZZO (2004).

Uma parceria entre o INMET e o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina gerou em 1998 o primeiro mapa nacional – Atlas de Irradiação Solar do Brasil – com base em dados oriundos de satélites geoestacionários “computados com o algoritmo do modelo físico BRASILSR” (COLLE E PERREIRA, 1998, p.6) e verificados através da validação com medições terrestres (MARTINAZZO, 2004).

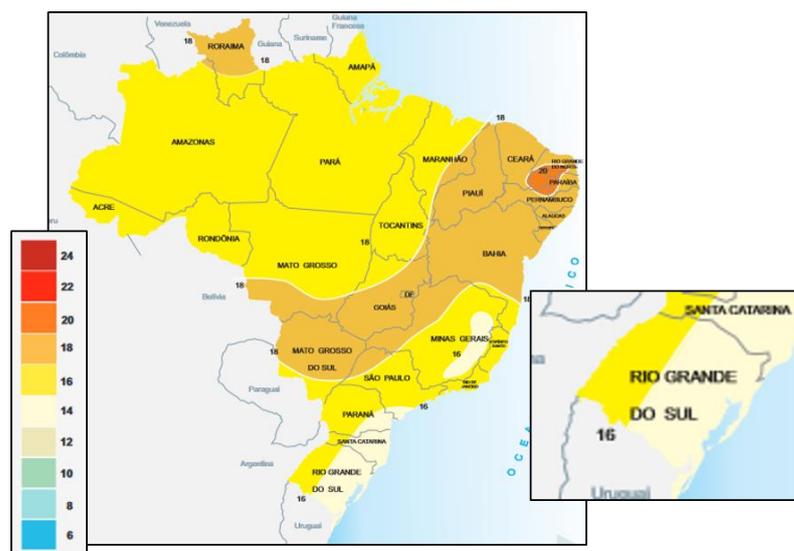
Figura 8 – Mapa da média anual típica de radiação do Atlas de Irradiação Solar do Brasil



Fonte: Adaptado de COLLE E PEREIRA (1998).

Em 2000, foi lançado o Atlas Solarimétrico do Brasil, parceria entre a Universidade Federal de Pernambuco e a Companhia Hidroelétrica do São Francisco. As isolinhas de radiação solar foram traçadas com base na extrapolação de dados em 200 km obtidos através do emprego de piranômetros (TIBA et al., 2000).

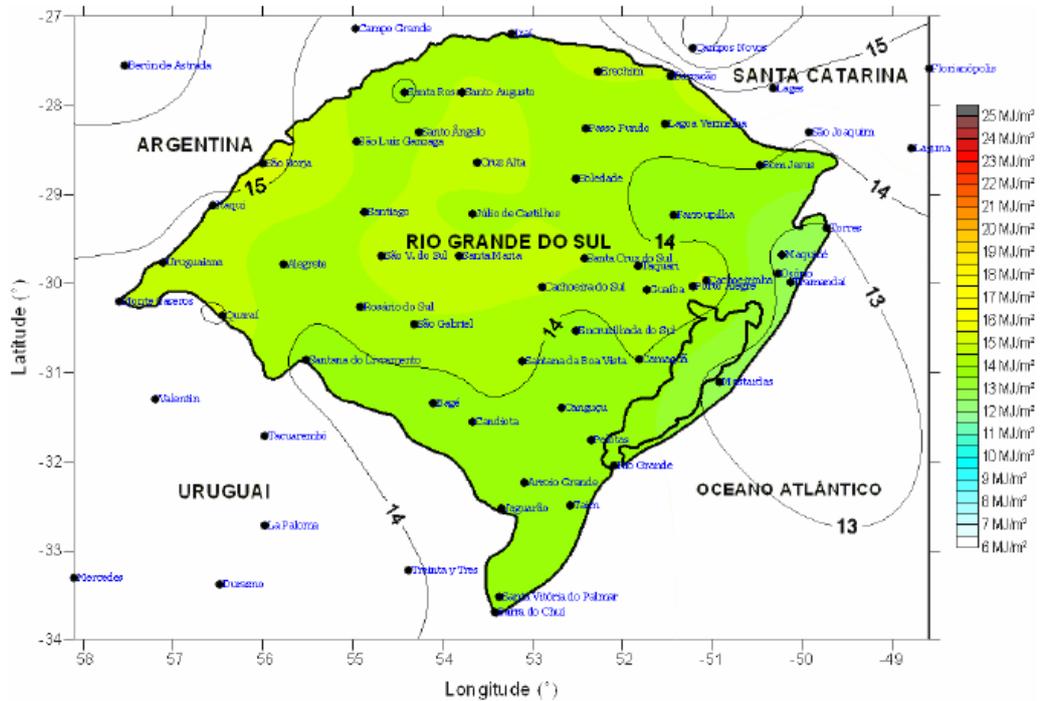
Figura 9 – Mapa da Radiação solar global diária do Atlas Solarimétrico do Brasil



Fonte: Adaptado de TIBA et al. (2000).

Martinazzo elaborou em 2004 mapas de radiação global horizontal para o estado com base em medições terrestre em combinação com diferentes dados disponíveis na ocasião. Na figura 10, ilustra-se o mapa de média anual diária apresentado em seu estudo.

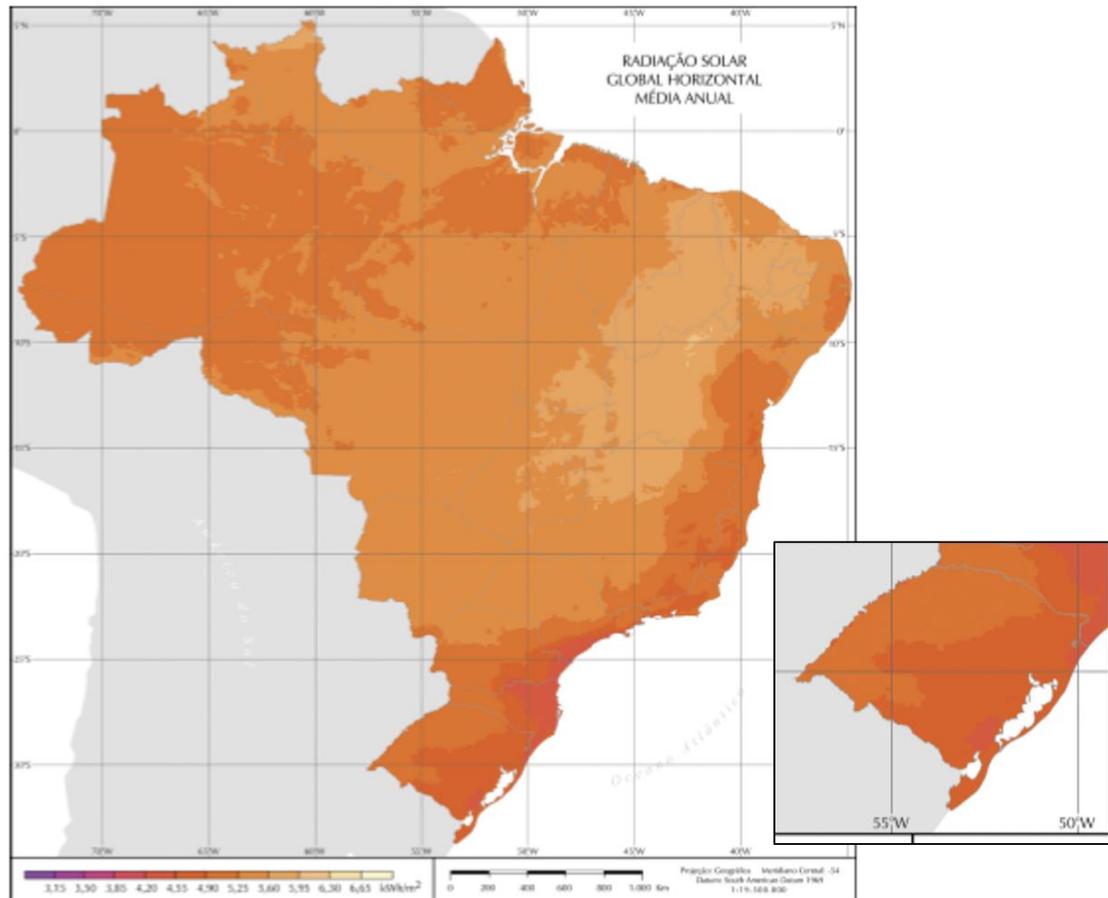
Figura 10 – Mapa de radiação solar global diária, média anual elaborado por MARTINAZZO



Fonte: MARTINAZZO (2004).

Em 2006, foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, produzido através da metodologia do projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2012, p. 27) “o Atlas Brasileiro de Energia Solar pode ser considerada a referência mais atual e completa”.

Figura 11 – Mapa da média anual de radiação global horizontal do Atlas Brasileiro de Energia Solar



Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2006).

### 3.2 Variações metodológicas

De modo geral, existem três principais métodos para a elaboração de mapas solarimétricos: a extrapolação de dados oriundos de diferentes estações, a interpolação de dados oriundos de diferentes estações e a aplicação de imagens de satélites para a estimativa de radiação através de modelos de transferência radiativa (GUARNIERI, et al. 2006).

Na extrapolação, de maneira geral, emprega-se como estimativa a medida realizada pela estação de medição mais próxima. Embora o emprego desta metodologia possa gerar dados confiáveis para aqueles pontos que se encontram próximos às estações de medição,

à medida que a distância entre os dois pontos aumenta, aumentam também os erros da estimativa, uma vez que a incidência de radiação depende das propriedades óticas da atmosfera (especialmente a cobertura de nuvens) particulares desses pontos. Como estas propriedades óticas não são espacialmente uniformes, dois locais podem receber intensidades de radiação diferentes mesmo que a distância entre eles não seja tão elevada. Para grandes distâncias, as diferenças também podem ocorrer por outros fatores que não as

condições atmosféricas distintas, como por exemplo, as trajetórias aparentes do Sol no céu e o comprimento do caminho ótico percorrido pela radiação solar na atmosfera, que dependem da latitude e longitude do local. (GUARNIERI, 2006<sup>4</sup>).

No entanto, de acordo com o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000) que empregou a extrapolação como metodologia para sua construção, para regiões fito geográficas homogêneas, dados extrapolados em até 200 km correspondem a um nível de confiança de 90%.

A metodologia de aplicação de imagens de satélites para a estimativa de radiação através de modelos de transferência radiativa, por sua vez, conforme já abordado, se dá através de dados provenientes de satélite geostacionário para processamento. O Atlas Brasileiro de Energia Solar, cujo modelo fora nomeado BRASIL-SR, fez uso de tal metodologia. De maneira geral, os mapas foram elaborados empregando a equação de transferência radiativa na atmosfera, as imagens produzidas por satélite e um banco de informações relacionados à dados climatológicos (MARTINS; PEREIRA; ABREU, 2007).

Na interpolação, finalmente, método empregado pelo presente trabalho na confecção dos mapas, com base em valores medidos de determinado atributo, são estimados valores desse mesmo atributo em diferentes pontos de uma área compreendida pelos pontos de medição (BURROUGH; MCDONNELL, 1998 apud CEMIG, 2012). Apesar de todas as metodologias mencionadas serem aceitas academicamente e de terem sido empregadas na elaboração de importantes mapas solarimétricos, algumas diferenças entre as elas devem ser apontadas para que fundamentem as considerações finais deste projeto. Parte-se da premissa de que dados coletados a partir de uma rede de piranômetros dispostos em um local de estudo certamente são mais confiáveis do que aqueles resultantes de estimativas. De acordo com Alsamamra et al. (2009, p. 1343, tradução nossa), “o processamento das informações de satélites fornece valores menos precisos do que aqueles medidos em solo”. Portanto, aqueles mapas oriundos de interpolações, conforme já exposto, resultam em mapas mais confiáveis.

No entanto, tanto Perez (1997) quanto Guarnieri(2006) chegaram à conclusão de que interpolações entre estações situadas a distâncias superiores a 50 km apresentam erros superiores aqueles estimados pela metodologia de emprego de dados de satélites. Ademais, a confiança atrelada às técnicas de interpolação é altamente dependente do tamanho das amostras disponíveis e a metodologia de krigagem, em especial, deve variar com a topografia das estações: quanto mais heterogêneo os terrenos das estações de coleta de dados, menor a confiabilidade da interpolação (ALSAMAMRA et al., 2009). Nas palavras de Alsamamra et al.

---

<sup>4</sup> Conteúdo sem paginação.

(2009, p. 1374, tradução nossa) , a “discontinuidade na elevação e na orientação da superfície (inclinação e aspecto), e a projeção de sombras por elementos da topografia podem criar intensos gradientes locais na radiação que a interpolação pode não considerar em sua estimativa”.

### 3.3 Modelo Interpolador Estocástico (Krigagem)

Um importante conceito para a compreensão do desenvolvimento e da metodologia do projeto é o da Krigagem, que pode ser caracterizada como um modelo interpolador estocástico. Interpoladores estocásticos podem ser definidos como aqueles que empregam a teoria das probabilidades que, através da incorporação de critérios estatísticos, atribuem pesos aos pontos amostrais durante o procedimento da interpolação. Em outras palavras, a krigagem se trata de uma metodologia de interpolação com método geoestatístico, que emprega a relação estatística entre os pontos medidos (SANTOS, 2014).

Um pressuposto para o emprego da krigagem é o de que a variável em estudo (no caso do presente projeto, a radiação global horizontal) se trata de uma variável regionalizada. De modo geral, uma variável regionalizada é aquela que apresenta uma dependência espacial e que, por essa razão, não deve ser interpolada de maneira puramente matemática, mas sim, através de uma metodologia que entenda essa dependência e projete resultados em função dela (SANTOS, 2014). Em termos geoestatísticos, segundo Landin e Sturaro (2002 apud SANTOS, 2014), a metodologia procura extrair de uma aparente aleatoriedade as propriedades probabilísticas dessa variável regionalizada, obtendo uma função de correlação entre os valores amostrados em função de suas distâncias e orientações no espaço.

Conforme exemplo descrito no Atlas Solarimétrico da CEMIG (2012), considerando dados de uma determinada população que se correlacionam espacialmente, se em um ponto  $p$  a variável regionalizada é  $x$ , a probabilidade indica que serão encontrados valores muito próximos à  $x$  quanto mais próximos estiverem do ponto  $p$ .

Para as seguintes representações matemáticas do conceito, adotou-se como referência o material disponibilizado pelo ArcGIS (ESRI, 2001a) e por Sebem (2017). Admite-se a Equação 1 para a modelagem da krigagem. Onde,  $s$  é a localização do ponto em coordenadas;  $Z(s)$  é o valor em um determinado ponto avaliado;  $\mu$  é a média; e  $\varepsilon$ , os erros aleatórios com dependência espacial.

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s) \quad (1)$$

As estimativas realizadas através desse modelo deverão se dar através da Equação 2.

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (2)$$

Onde,  $Z(S_i)$  é o valor da variável regionalizada medido em determinado ponto  $i$ ;  $\lambda_i$  é um peso desconhecido para a variável conhecida  $Z(S_i)$ ;  $S_0$  é o ponto que se encontra a variável sendo predita  $\hat{Z}$ .

O peso  $\lambda_i$  é a variável que diferencia a krigagem de demais interpolações, uma vez que, enquanto em outras interpolações ele varia somente em função da distância entre o ponto de medição e de estimativa, na krigagem, o mesmo responde ao semivariograma estimado, à distância entre a estimativa e a medição e também à relação espacial envolvendo os valores medidos e estimados (ESRI, 2001a).

Parte-se da premissa de que a melhor estimativa será aquela em que o estimador não for tendencioso e com menor variância. A fim de que se garanta uma estimativa não-tendenciosa, assume-se que a soma dos pesos amostrais deve ser igual a 1, conforme ilustra a Equação 3.

$$\sum \lambda_i = 1 \quad (3)$$

A variância dessa estimativa é dada pela Equação 4.

$$\sigma^2 = \mu + \sum \lambda_i \gamma(S_i, S_0) \quad (4)$$

Onde  $\mu$  é o multiplicador de Lagrange e  $\gamma(S_i, S_0)$  o semivariograma para a distância entre  $S_i$  e  $S_0$ .

Os valores dos pesos  $\lambda_i$  são calculados através da Equação 5.

$$\lambda = A^{-1} \times b \quad (5)$$

Onde  $A$  é a matriz de semivariâncias entre os pares de pontos utilizados para a interpolação e  $b$  “a matriz coluna das variâncias entre os valores amostrados e o ponto a ser estimado” (SEBEM).

“As semivariâncias são determinadas por modelos ajustados ao semivariograma experimental ( $\hat{\gamma}$ )” (MARQUES et al., 2012, p. 178). Este semivariograma experimental, ainda de acordo com os autores é obtido através da Equação 6.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(S_i) - z(S_i + h)\}^2 \quad (6)$$

Onde  $n$  é o número de pares amostrais do atributo  $z$ ;  $h$  é a distância pela qual estão separados.

#### 4 DADOS DE RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

Os dados empregados no presente trabalho foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e são oriundos de estações meteorológicas automáticas dispostas em 38 municípios do estado, conforme ilustrado no mapa da Figura 12.

Figura 12 – Estações do INMET cujos dados foram disponibilizados



Fonte: Autora (2017).

Os dados cedidos por cada estação se encontram disponíveis em planilhas que contêm informações referentes à temperatura, à umidade, ao ponto de orvalho, à pressão, à velocidade do vento, à precipitação e à radiação registrada. As planilhas apresentam dados para cada hora da série temporal e as mesmas são dispostas em *Universal Time Coordinated* (UTC).

De acordo com a Nota Técnica sobre a rede de estações meteorológicas automáticas do INMET (2011, p.3), cada estação é instalada

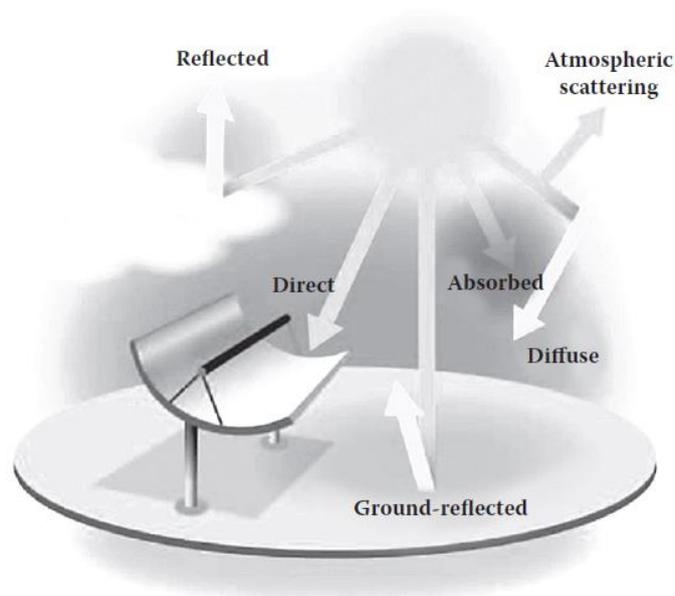
em uma base física, numa área livre de obstruções naturais e prediais, situada em área gramada mínima de 14m por 18m, cercada por tela metálica (para evitar entrada de animais). Os sensores e demais instrumentos são fixados em um mastro metálico de 10 metros de altura, aterrado eletricamente (malha de

cobre) e protegido por pára-raios. Os aparelhos para as medições de chuva (pluviômetro) e de radiação solar, bem como a antena para a comunicação, ficam situados fora do mastro, mas dentro do cercado .

#### 4.1 Radiação Global Horizontal

A Terra recebe continuamente aproximadamente  $1,8 \times 10^{17}$  W de radiação solar e, no entanto, apenas cerca da metade atinge a superfície terrestre em função de fatores tais como a absorção, dispersão, e reflexão da mesma durante sua passagem pela atmosfera. À radiação que chega em solo plano e horizontal terrestre oriunda da emissão solar direta é dado o nome de radiação direta, enquanto à parcela de radiação que chega em solo plano e horizontal oriunda de objetos vizinhos, nuvens, por exemplo, é dado o nome de radiação difusa. À soma dessas duas componentes de radiação é dado o nome de radiação global. A Figura 13 ilustra às componentes da radiação global.

Figura 13 – Componentes da radiação global



Fonte: NREL apud MYERS, 2013.

A definição e o entendimento desses componentes são de suma importância para a aplicação de tecnologias relacionadas à conversão da radiação solar, uma vez que o aproveitamento delas varia de acordo com as aplicações almejadas. Concentradores solar, por exemplo, convertem apenas a parcela de radiação direta; enquanto coletores solar planos são sensíveis à radiação global incidida nos mesmos (WALD, 2010).

#### 4.2 Instrumentos utilizados na coleta dos dados de radiação global

Os dados de radiação global empregados para a elaboração da presente pesquisa foram obtidos através do uso de piranômetros Eppley PSP, instrumentos utilizados para a medição da radiação global horizontal. Trata-se de um piranômetro termoelétrico cujo

elemento sensível (...) é, em essência, uma pilha termoelétrica, constituída por pares termoelétricos (termopares) em série. Tais termopares geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre suas juntas, as quais se encontram em contato térmico com placas metálicas que se aquecem de forma distinta, quando iluminadas. Portanto, a diferença de potencial medida na saída do instrumento pode ser relacionada com o nível de radiação incidente (CEMIG, 2012, p.30).

De acordo com o Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al., 2000), o piranômetro em questão se trata de um equipamento com a superfície coletora totalmente preta, compensado em temperatura, sendo um instrumento de precisão de primeira classe, o que, segundo LYRA et al. (1993 apud CEMIG, 2012), indica precisão de 2 a 5%. A figura 14 ilustra o equipamento.

Figura 14 – Ilustração do piranômetro Eppley PSP



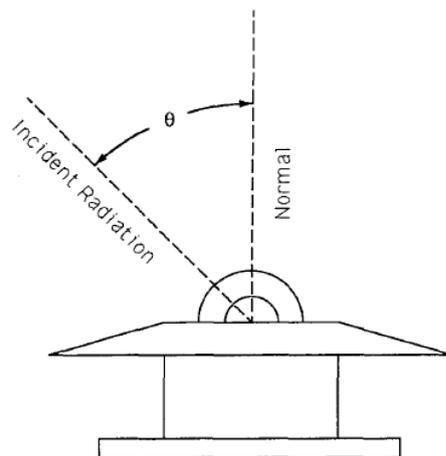
Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

Em seu artigo, Gueymard e Myers (2007) dissertam sobre os erros relacionados às medições de radiação em solo por meio do emprego de piranômetros. Os dados foram coletados na estação *Solar Radiation Research Laboratory (SRRL)* da *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* em Golden, Colorado. A escolha da estação se deu em função de seu papel fundamental na calibração de um grande número de instrumentos todo ano e desenvolvidas e aperfeiçoadas técnicas de calibração para vários tipos de instrumentos; e em função de que, pelo fato de muitos piranômetros estarem monitorando paralelamente o mesmo fenômeno, faz-

se possível a comparação dos dados obtidos por instrumentos com diferentes capacidades, correções e etc. Constatou-se que a radiação global é negativamente afetada sob céu claro ou parcialmente claro por conta de duas fontes de erro: a primeira, sendo o cosseno do sensor; a segunda, a compensagem térmica (*termal offset*) (GUEYMARD; MYERS, 2007).

Ainda que o cosseno do sensor seja um erro desprezível para a radiação difusa, o mesmo é significativo para a radiação direta, maior parcela da radiação global sob céus claros (GUEYMARD; MYERS, 2007). O erro do cosseno do sensor diz respeito à geometria da incidência da radiação, conforme ilustrado na Figura 15, por onde é definido o ângulo da incidência em relação à *normal* dos sensores (com cobertura de  $2\pi$  rad). Sob condições ótimas, quando empregados instrumentos de medição da radiação, pressupõe-se que sua resposta decresce em acordo com o cosseno do ângulo da incidência (MICHALSKY, 1995).

Figura 15 – Ilustração da geometria da incidência de radiação



Fonte: MICHALSKY (1995).

A segunda e mais importante fonte de erro desses piranômetros é o fenômeno da compensagem térmica (*termal offset*). Simplificadamente, a compensagem térmica é um sinal estimulado pela diferença de temperatura entre a cúpula interna de vidro e o detector do piranômetro em questão, resultante do fato que o disco de cerâmica preto absorve não somente a radiação transmitida pelas cúpulas de vidro (ilustradas na Figura 16), mas também a radiação infravermelha emitida pelo instrumento (SANCHEZ, et al. 2015). Apesar do fenômeno ser “facilmente observado à noite como uma tensão residual negativa” (HAAG; KREZINGER; STOFFEL, 2011), ele também interfere nos valores diurnos. Um estudo conduzido na Espanha indica que os valores de *offset* noturno e diurno são consideravelmente diferentes, e, portanto, orienta “contra o procesimento comum em que se assume que o *offset* noturno é uma estimativa

apropriada para o *offset* diurno” (SANCHEZ et al, 2015, p.244, tradução nossa). Em relação ao *offset* diurno, o estudo concluiu que os maiores valores de comensagem térmica, *offset*, ocorrem em situações com baixa fração de radiação difusa e temperaturas ambientes altas (SANCHEZ et al. 2015). Corroborando com o exposto, Bush (2010 apud HAAG; KREZINGER; STOFFEL, 2011) estimou para dias sem nuvens valores de *offset* diurno próximos a zero; e para dias sem nuvens, próximos a  $-20 \text{ W/m}^2$ . Finalmente, com a intenção de comparar o efeito das variações climáticas sob as conclusões do estudo elaborado em *Colorado* por Gueymard e Myers (2007), Haag et al. (2011) elaboraram um estudo semelhante em Porto Alegre, na estação do LABSOL da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Concluiu-se que o piranômetro Eppley PSP, ao ser comparado com o TSP-700 da empresa YES e com o CM22 da Kipp & Zonen, apresentou os valores de *offset* mais altos medidos – podendo, durante períodos de céu limpo e baixa umidade relativa, apresentar valores instantâneos acima de  $10 \text{ W/m}^2$  no valor do *offset* térmico.

## 5 METODOLOGIA

As planilhas registradas pelo INMET<sup>5</sup> apresentam dados referentes à uma série de informações meteorológicas; no entanto, uma vez que o objetivo geral do presente estudo diz respeito tão somente aos dados de irradiação global horizontal, as demais variáveis não deverão ser utilizadas no decorrer dos procedimentos metodológicos previstos neste trabalho.

Tais procedimentos serão segmentados em três diferentes etapas, sendo elas o tratamento dos dados, a obtenção das médias de irradiação global horizontal e a interpolação dos dados no processo de construção dos mapas solarimétricos.

### 5.1 Tratamento dos Dados

A etapa inicial para a condução do presente trabalho será a de verificação dos dados de irradiação global horizontal prestados pelo INMET. Tal etapa é de substancial importância para o desenvolvimento do estudo, uma vez que o mesmo tem como objetivo específico a disponibilização dos resultados dessa etapa para todos aqueles interessados em dar seguimento a diferentes pesquisas baseadas nos dados tratados. Para tanto, a planilha de cada um dos municípios contendo a série temporal dos dados coletados deverá ser avaliada, com a finalidade de que sejam verificados eventuais desvios, lacunas ou falhas não previstas. Haja vista que o projeto prevê a elaboração de médias anuais, sazonais e mensais da irradiação global horizontal para a criação dos mapas de contorno, aqueles municípios que apresentarem uma série temporal menor que três anos não serão empregados no desenvolvimento do estudo.

Realizada a verificação de quais municípios deverão ser empregados no projeto, a etapa de tratamento prevê o preenchimento de eventuais dados faltantes nas planilhas (doravante, *gaps*), isso é, aqueles decorrentes de falhas operacionais do piranômetro ou da estação ao longo de todas as séries temporais de todos os municípios. Para tanto, adaptou-se metodologia descrita por Hoyer-Lick (2009) (apud SCHÜLER, 2016).

- *Gaps* de até três horas consecutivas deverão ser interpolados com os valores medidos mais próximos. As interpolações devem levar em consideração somente os dados originais e válidos das planilhas, isso é, aqueles *gaps* maiores que uma hora não deverão levar em consideração no cálculo os valores já interpolados.

---

<sup>5</sup> Disponibilizadas pela Profa. Dr. Claudinéia Brazil Saldanha

- *Gaps* de três horas a quatro dias deverão ser preenchidos através da média dos valores mais próximos (até 96 horas distantes) para os mesmos horários. No caso dos dados mais próximos também conterem *gaps*, deverá ser empregada a metodologia para dados faltantes por mais de 4 dias.
- *Gaps* maiores que 4 dias deverão ser preenchidos com a média dos valores para a mesma hora, dia e mês dos anos anterior e posterior. No caso do *gap* se localizar no primeiro ou último ano de medição, deverá ser empregado, ao invés da média, apenas o valor do ano anterior ou seguinte.

Uma vez preenchidos os *gaps* de dados, deverá ser realizada uma análise nas séries temporais de todos os municípios, a fim de que sejam verificadas possíveis não-conformidades nos dados e traçadas as medidas corretivas para a condução das próximas etapas metodológicas. Para tanto, o trabalho prevê a elaboração de gráficos de dispersão contendo toda a série temporal de cada município, a fim de que qualquer ponto que destoe do comportamento dos dados seja facilmente observado.

Aqueles dados que desviarem do comportamento do gráfico, demonstrando ser resultado de algum erro no curso da obtenção dos dados, e que resultarem em prejuízos às médias a serem geradas, deverão ser entendidos como lacunas e ser interpolados conforme a metodologia já explicada.

Finalmente, conforme já abordado, os dados coletados pelos piranômetros carregam uma distorção resultante do fenômeno *offset*. Nas séries temporais disponíveis pelo INMET dados noturnos (sobretudo) são descritos como valores negativos. A fim de que não impliquem em maiores reduções no valor médio a ser calculado, prevê-se a substituição desses valores por um indicativo do fenômeno, sem, no entanto, um maior estudo quanto ao fenômeno nos valores diurnos. Tais modificações devem estar presentes nas planilhas tratadas a serem disponibilizadas.

## 5.2 Obtenção das médias de irradiação global horizontal

Uma vez selecionadas e tratadas todas as séries temporais dos municípios empregados, deverão ser calculados a média diária mensal, a média diária sazonal e a média diária anual de radiação global por meio do conhecimento do dia médio de cada mês para cada município.

O dia médio do mês nada mais é do que o quociente da soma de toda a radiação registrada no mês pelo número de dias do mês. Uma vez calculados o dia médio de todos os

meses ao longo da série temporal, deverá ser realizada a média mensal do dia médio para todos os doze meses do ano, a *média diária mensal*. Através da média diária mensal, será gerada a média diária sazonal e anual de radiação global horizontal de cada estação de medição.

### 5.3 Interpolação dos dados na elaboração dos mapas

A interpolação dos dados deverá ser realizada no software ArcGIS, em seu componente ArcMap, que é a aplicação central do software (ARCGIS, 2017). O presente projeto prevê a adoção de medidas padrão (*default*) do software ArcMap para o tratamento de interpolação. A metodologia default assume a krigagem simples, que define que as médias locais empregadas serão constantes e semelhantes às médias da população, ao invés de estimadas com base nos pontos vizinhos. Sabe-se que a krigagem ordinária é mais empregada para estimar dados de radiação solar; no entanto, uma vez que é prevista a investigação do erro padrão da estimativa dos mapas, assumir-se-á a metodologia da krigagem simples e todas as demais premissas da krigagem default do software.

Assim, uma vez elaborados os mapas de média diária anual, médias diárias sazonais e médias diárias mensais, é previsto o estudo dos erros relacionados às estimativas feitas pelo software. Sendo eles o *Root-Mean-Square Error*, o *Mean Standardized Error*, o *Root-Mean-Square Standardized Error*, e o *Average Standard Error*; ilustrados, respectivamente, pelas Equações 7, 8, 9 e 10 (ESRI, 2016b), onde  $\hat{Z}(s_i)$  é o valor estimado e  $z(s_i)$  o valor medido no ponto  $s_i$ ;  $n$ , o número de amostras; e  $\hat{\sigma}(s_i)$ , a variância para o local.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))^2 / n} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i) / n \quad (8)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i) \right)^2 / n} \quad (9)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}^2(s_i)} \quad (10)$$

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Tratamento dos Dados

Conforme previsto, inicialmente, foram verificados quais municípios poderiam ser empregados no curso do projeto, isso é, quais deles apresentavam mais de três anos de medição de radiação global. Conforme ilustrado na Tabela 1, os municípios Campo Bom, Ibirubá e Teutônia, por não contemplarem o requisito, foram descartados.

Tabela 1 – Anos de medição das estações

Estação	Lat (°)	Long (°)	Anos de medição
Alegrete	-29,71160	-55,5261	7,5
Bagé	-31,34780	-54,01330	7,2
Bento Gonçalves	-29,16720	-51,53470	7,2
Caçapava do Sul	-30,54770	-53,46750	6,2
Camaquã	-30,81060	-51,83470	7,2
Campo Bom	-29,67440	-51,64200	0,3
Canela	-29,36880	-50,82740	4,6
Canguçu	-31,40580	-52,70110	6,2
Chuí	-33,7418	-53,3714	5
Cruz Alta	-28,60300	-53,67360	6,8
Dom Pedrito	-30,99250	-54,81530	3,9
Erechim	-27,66030	-52,30640	7,2
Frederico Westphalen	-27,39560	-53,42940	6,2
Ibirubá	-28,65350	-53,11190	1,2
Jaguarão	-32,55420	-53,37640	7,2
Lagoa Vermelha	-28,22190	-51,51220	7,1
Mostardas	-31,24780	-50,90570	6,1
Palmeira das Missões	-27,91990	-53,31740	6,1
Passo Fundo	-28,22940	-52,40390	7,2
Porto Alegre	-30,05000	-51,16660	13,3
Quaraí	-30,36860	-56,43720	6,2
Rio Grande	-32,07890	-52,16780	11,3
Rio Pardo	-29,87330	-52,38250	7,2
Santa Maria	-29,70000	-53,70000	7,2
Santa Rosa	-27,89010	-54,47970	6,2
Santana do Livramento	-30,84220	-55,61310	13
Santiago	-29,19140	-54,88560	5,2
Santo Augusto	-27,85000	-53,78330	12,3
São Borja	-28,64940	-56,01560	6,3
São Gabriel	-30,34140	-54,31080	6,3
São José dos Ausentes	-28,75140	-50,05830	7,2
São Luiz Gonzaga	-28,41720	-54,96250	6,3
Soledade	-28,85360	-52,54170	6,1
Teutônia	-29,45010	-51,82420	1,5
Torres	-29,35030	-49,73310	7,2
Tramandaí	-30,00970	-50,13530	6,1
Uruguaiana	-29,84250	-57,08250	7,2
Vacaria	-28,51360	-50,88280	5,9

Fonte: Autora (2017).

### 6.1.1 Verificação das datas nas séries temporais

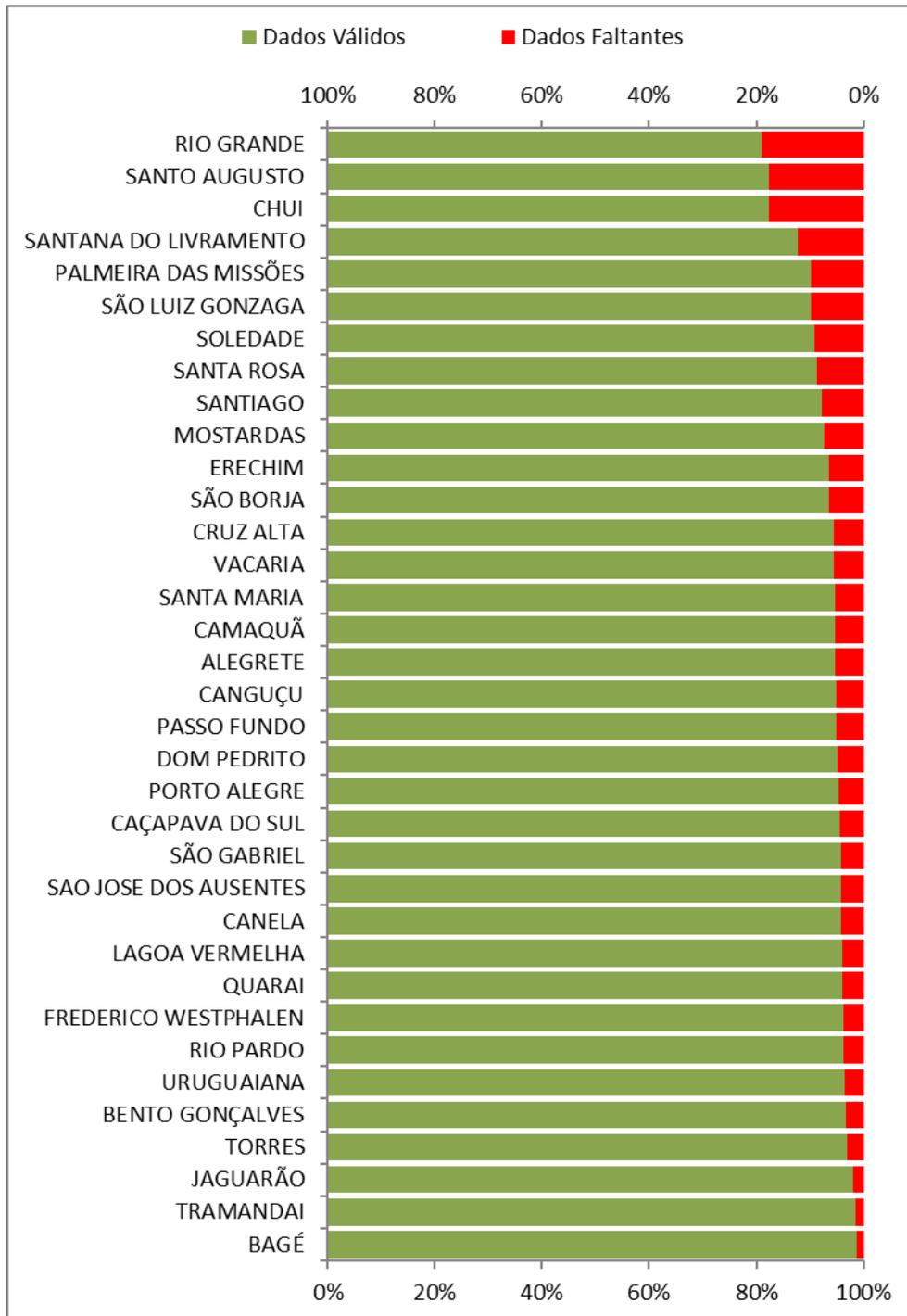
Selecionados os municípios, as datas e horas dispostas em todas as séries temporais foram verificadas, com o objetivo de que não implicassem em prejuízos nas médias finais. Através de uma planilha elaborada com a única finalidade de detectar tais falhas, erros como datas duplicadas e preenchimento incorreto de dias, meses e anos, foram verificados e tratados.

### 6.1.2 Preenchimento dos dados Faltantes e Verificação de Incoerências

Para o preenchimento dos dados faltantes, haja vista que as séries temporais de todos os municípios eram consideravelmente longas, foi elaborada uma planilha contendo a metodologia de tratamento já descrita na metodologia do projeto. Essa etapa foi bastante trabalhosa devido ao grande número de dados faltantes e da dificuldade em tratá-los quando os mesmos se apresentavam ciclicamente (dados faltantes em todas as madrugadas do mês, por exemplo). Tal dificuldade advém do fato de que a metodologia prevista para o preenchimento desses dados se dava através da consulta aos dados vizinhos e/ou aos dados de outros dias e anos.

A Figura 16 foi elaborada com a intenção de ilustrar a dimensão da etapa de preenchimento dos dados faltantes. Estações como a de Bagé, por exemplo, que conteve em seu registro quase 100% dos dados sem *gaps* no decorrer das séries temporais, exigiram menores medidas corretivas do que aqueles como Rio Grande, que apresentou, aproximadamente, 20% das horas medidas com *gaps* de dados.

Figura 16 – Percentual de dados válidos e faltantes

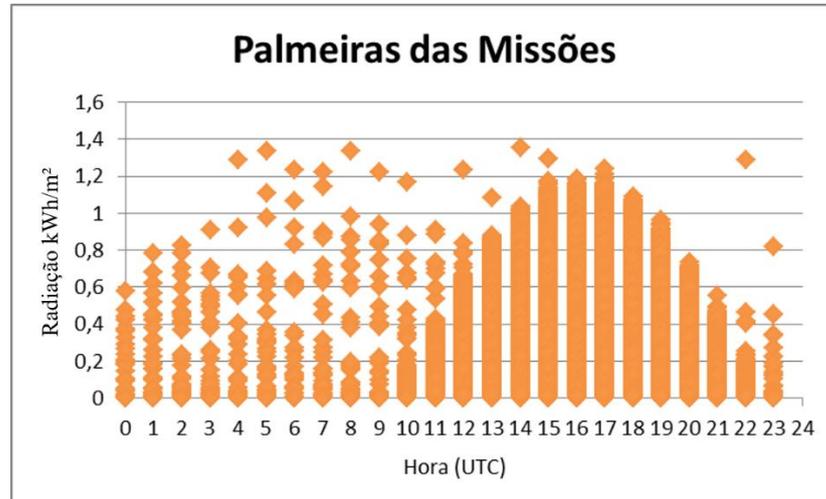


Fonte: Autora (2017).

Uma vez preenchidos todos os dados faltantes, foram gerados, para cada estação, gráficos de dispersão contendo todos os dados horários de radiação de suas séries temporais completas. O objetivo foi tornar possível a visualização de eventuais incoerências nos dados de radiação ao longo dos anos de medição. Algumas estações, tais como a de Palmeira das Missões, apresentaram dados incoerentes que puderam ser identificados através da elaboração

de tais gráficos, conforme ilustra a Figura 17. Uma vez identificados, os dados que não corresponderam ao perfil esperado foram tratados como se fossem dados faltantes através da metodologia de preenchimento dos mesmos.

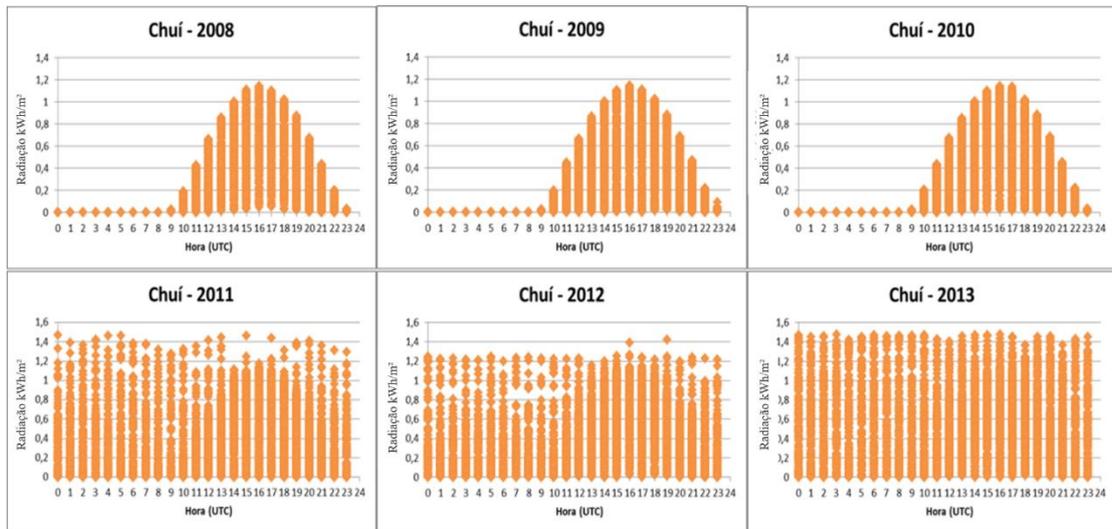
Figura 17 – Exemplo de gráfico de dispersão contendo incoerências



Fonte: Autora (2017).

Conforme ilustra a Figura 18, a estação de Chuí apresentou três anos de medições com inconsistências nos dados registrados (tais como altos valores de radiação durante a madrugada). No entanto, pelo fato de ter apenas cinco anos de registro de dados, entendeu-se que os dois anos de medição coerentes não seriam suficientes para tratar os demais. Logo, optou-se – em coerência com o pressuposto inicial, em que se fez necessário um mínimo de três anos de medição para o emprego da estação– pelo não emprego dos dados da estação de Chuí na condução das demais etapas metodológicas.

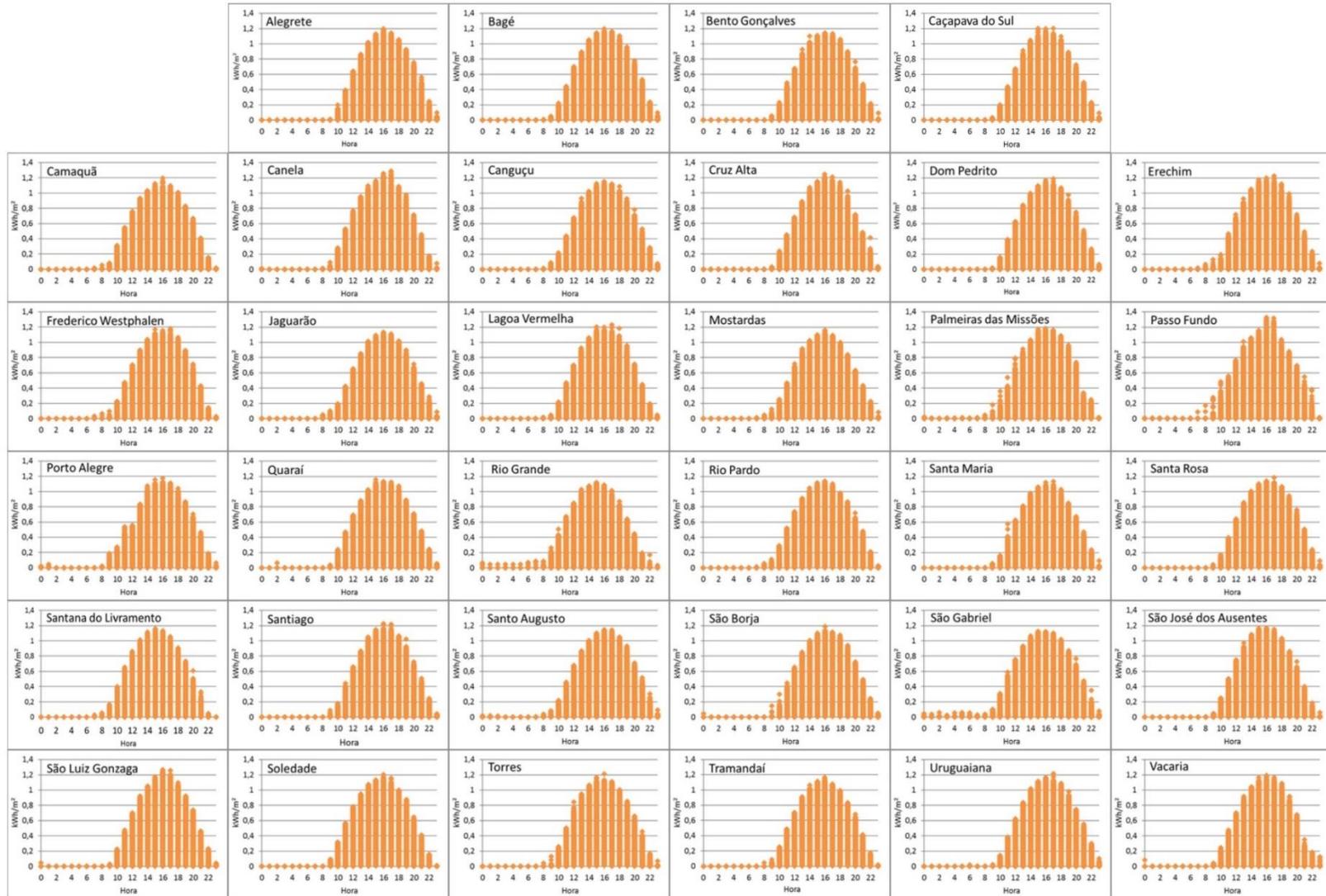
Figura 18 – Erros encontrados no tratamento de dados da estação de Chuí



Fonte: Autora (2017).

Os gráficos de dispersão elaborados para todos os municípios, uma vez tratados os dados faltantes e incoerentes, estão dispostos na Figura 19, que ilustra um comportamento padrão entre todas as séries temporais: na maioria das estações, o ponto máximo de radiação se dá às 13 horas (horário de Brasília).

Figura 19 – Gráficos de dispersão gerados após tratamento de dados para todos os municípios



Fonte: Autora (2017).

## 6.2 Obtenção das médias de irradiação global horizontal

Conforme exposto na metodologia, inicialmente, foram calculados os dias médios de cada mês através da soma de todos os dados de radiação do mês e divisão pelo número de dias dos meses. Nessa etapa, aqueles meses iniciais e finais que não tivessem sido iniciados exatamente no primeiro dia do mês ou terminado exatamente no último, tiveram a soma da radiação dividida pelo exato número de dias em que os dados de radiação foram medidos.

Foram avaliados todos os dias médios do mês de toda a série temporal de cada município a fim de que se verificasse possíveis desvios nas médias decorrentes de erros relacionados ao tratamento dos dados ou ainda erros na obtenção dos mesmos. Os dias médios dos meses que apresentaram nítida distorção não foram empregados no cálculo da média mensal de radiação global horizontal do município. Tais alterações são ilustradas no Quadro 1.

Quadro 1 – Alterações na elaboração das médias

MUNICÍPIO	ALTERAÇÃO
Cruz Alta	Retirado ano de 2011
Palmeira das Missões	Retirados mar/2010, abr/2010, mai/2010, jun/2010, jun/2011, jul, 2011, ago, 2011, set/2011
Passo Fundo	Retirados mar/2012 e abr/2012
Rio Grande	Retirados os anos 2005, 2006 e 2007 e o mês dez/2012
Uruguaiana	Retirados jul/2011, ago/2011, set/2011, out/2011 e nov/2011
Vacaria	Retirados dez/2012 e out/2013

Fonte: Autora (2017).

Uma das possíveis fontes desses erros é o fato de que as planilhas disponibilizadas pelo INMET apresentaram algumas incongruências relacionadas à pontuação das casas decimais nos dados de radiação. Tais discrepâncias não puderam ser visualizadas nos gráficos de dispersão pelo fato de que eram valores menores do que a média ou, ainda, valores representados por “*offset*”. Desse modo, uma vez que, por conta de eventuais dias chuvosos, nublados e etc., devem ser previstos valores baixos de radiação para todos os horários, os valores incoerentes não puderam ser discriminados dos demais. Somente através da elaboração dos dias médios de todas os meses das séries temporais é que se fizeram notar, como longas séries de distorções ou, ainda, séries cíclicas em desajuste. Verificados tais inconsistências, foram geradas as médias mensais de radiação global horizontal para todos os municípios e, através delas, as médias sazonais e anuais de todos eles, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Médias diárias mensais, sazonais e anuais para cada município estudado

MUNICÍPIO	RADIÇÃO kWh/m <sup>2</sup> /dia																
	MENSAL												SAZONAL			ANUAL	
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ver.	Out	Inv.		Prim.
Alegrete	7,031	6,165	5,561	4,410	3,145	2,576	2,821	3,513	4,485	5,734	6,857	7,328	6,841	4,372	2,970	5,692	4,982
Bagé	7,099	6,117	5,487	4,351	3,109	2,571	2,798	3,304	4,241	5,531	6,859	7,520	6,912	4,316	2,891	5,544	4,927
Bento Gonçalves	6,333	5,661	4,860	4,145	2,983	2,440	2,813	3,374	4,090	4,953	6,311	6,630	6,208	3,996	2,876	5,118	4,544
Caçapava do Sul	6,843	5,986	5,299	4,248	2,969	2,563	2,669	3,370	4,166	5,375	6,457	7,131	6,654	4,172	2,867	5,333	4,767
Camaquã	6,071	5,262	4,488	3,830	2,793	2,239	2,429	2,839	3,575	4,635	5,980	6,439	5,924	3,704	2,502	4,730	4,214
Canela	5,959	5,304	4,663	4,059	2,875	2,514	2,778	3,220	4,010	5,007	6,019	6,322	5,862	3,866	2,837	5,012	4,388
Canguçu	6,229	5,634	4,843	3,984	2,835	2,368	2,603	2,956	3,754	4,873	6,204	6,612	6,158	3,887	2,642	4,944	4,360
Cruz Alta	6,841	5,753	5,173	4,529	3,265	2,676	3,045	3,627	4,232	4,929	6,625	7,114	6,569	4,322	3,116	5,262	4,814
Dom Pedrito	7,199	6,039	5,547	4,266	3,044	2,620	2,878	3,506	4,599	5,802	7,070	7,424	6,887	4,286	3,001	5,824	5,042
Erechim	6,466	5,912	5,222	4,351	3,189	2,777	3,132	3,706	4,421	4,989	6,500	6,769	6,383	4,254	3,205	5,303	4,780
Frederico Westphalen	6,588	5,713	5,171	4,326	3,117	2,610	2,965	3,629	4,260	5,209	6,380	6,818	6,373	4,205	3,068	5,283	4,728
Jaguarão	6,823	5,710	4,990	3,820	2,680	2,244	2,402	2,851	3,862	5,082	6,380	6,937	6,490	3,830	2,499	5,108	4,500
Lagoa Vermelha	6,426	5,824	5,118	4,252	3,064	2,632	2,992	3,514	4,254	4,889	6,424	6,752	6,334	4,145	3,046	5,189	4,676
Mostardas	7,147	6,163	5,358	4,127	3,095	2,642	2,697	3,324	4,164	5,543	6,767	7,368	6,893	4,194	2,888	5,491	4,868
Palmeira das Missões	6,521	5,915	5,225	4,461	3,290	2,736	3,060	3,652	4,129	4,817	6,345	6,189	6,208	4,326	3,149	5,097	4,748
Passo Fundo	6,421	5,876	4,994	4,334	2,578	2,570	2,972	3,437	4,143	4,935	6,286	6,849	6,382	3,969	2,993	5,122	4,678
Porto Alegre	6,228	5,641	4,768	3,638	2,597	2,156	2,375	2,937	3,764	4,789	5,707	6,142	6,004	3,668	2,489	4,754	4,228
Quaraí	7,036	6,084	5,535	4,327	2,975	2,527	2,822	3,524	4,429	5,754	6,677	7,296	6,805	4,279	2,957	5,620	4,925
Rio Grande	6,572	5,523	4,950	3,873	2,771	2,306	2,400	3,025	3,948	5,108	6,376	6,895	6,330	3,865	2,577	5,144	4,373
Rio Pardo	6,503	5,808	4,929	3,985	2,939	2,333	2,529	3,054	3,870	4,852	6,190	6,836	6,382	3,951	2,639	4,970	4,489
Santa Maria	6,424	5,587	4,867	3,988	2,895	2,320	2,586	3,026	3,884	4,884	6,125	6,858	6,290	3,917	2,644	4,964	4,461
Santa Rosa	6,789	5,888	5,318	4,428	3,110	2,581	2,884	3,609	4,343	5,637	6,481	6,849	6,509	4,285	3,025	5,487	4,823
Santana do Livramento	6,895	5,871	5,110	3,907	2,823	2,271	2,748	3,266	4,136	5,471	6,468	6,627	6,464	3,947	2,762	5,358	4,633
Santiago	6,896	5,950	5,046	4,512	3,281	2,789	2,937	3,579	4,453	5,399	6,697	7,196	6,681	4,280	3,101	5,516	4,965
Santo Augusto	6,573	5,928	5,003	4,187	3,247	2,533	2,866	3,464	4,144	4,810	6,199	6,255	6,252	4,145	2,954	5,051	4,606
São Borja	7,037	6,042	5,508	4,483	3,330	2,705	3,003	3,727	4,635	5,643	6,738	7,182	6,754	4,441	3,145	5,672	5,007
São Gabriel	6,986	6,048	5,363	4,272	2,971	2,468	2,592	3,285	4,209	5,518	6,623	7,310	6,781	4,202	2,782	5,450	4,811
São José dos Ausentes	5,858	5,371	4,878	4,215	3,127	2,734	3,125	3,614	4,250	5,016	6,160	6,279	5,836	4,073	3,158	5,142	4,544
São Luiz Gonzaga	7,008	6,047	5,683	4,622	3,322	2,820	3,106	3,721	4,551	5,567	6,807	7,201	6,752	4,542	3,216	5,642	5,039
Soledade	6,450	5,757	5,124	4,221	2,959	2,608	2,847	3,471	4,274	5,457	6,954	6,945	6,384	4,101	2,975	5,562	4,749
Torres	6,221	5,572	4,749	4,139	3,148	2,532	2,777	3,306	4,049	4,979	6,118	6,469	6,087	4,012	2,872	5,049	4,501
Tramandaí	6,652	5,888	5,066	4,080	3,015	2,408	2,577	3,210	3,845	5,288	6,382	6,845	6,462	4,053	2,732	5,171	4,606
Uruguaiana	7,191	6,266	5,569	4,456	3,194	2,494	3,002	3,594	4,164	5,602	6,899	7,196	6,884	4,406	3,030	5,555	5,006
Vacaria	6,026	5,565	4,911	3,537	3,071	2,596	2,966	3,543	4,025	5,060	5,962	6,300	5,964	3,840	3,035	5,016	4,396

Fonte: Autora (2017).

Através da Tabela 2 é possível observar a grande variação sazonal nos dados de cada estação, corroborando com o exposto no Atlas Brasileiro de Energia Solar, que conclui que a “irradiação solar global apresenta maior variação inter-sazonal na região Sul” (PEREIRA et al., 2006, p.32). Para a melhor visualização da variação mensal da incidência de radiação global em cada estação, uma vez que são empregadas as médias de 34 estações e que, por meio de um único gráfico, poderia ser difícil de verificação dos dados, foram gerados seis gráficos ilustrando a variação das médias diárias mensais de radiação global horizontal para cada estação. Os gráficos se encontram ilustrados na Figura 20.

Figura 20 – Ilustração das médias de todas as estações



Fonte: Autora (2017).

Por intermédio da Figura 22, é possível visualizar que, de maneira geral, o comportamento dos dados segue o mesmo padrão: meses de inverno com menor, meses de

primavera e outono com médias; e meses de verão com as maiores incidências de radiação global horizontal. De maneira geral, o mês de julho foi aquele que conteve as médias mais baixas; e o de dezembro, as mais altas.

### 6.3 Interpolação dos dados e elaboração dos mapas

A Figura 21 ilustra a dispersão das estações das quais os dados deverão ser interpolados, uma vez eliminados os municípios que não corresponderam às premissas do presente projeto.

Figura 21 – Estações do INMET cujos dados foram empregados na confecção dos mapas



Fonte: Autora (2017).

Conforme definido, os gráficos foram gerados através das aplicações padrões de tratamento da krigagem do software ArcGIS e sua extensão ArcMap. Com a finalidade de que se facilitasse a comparação dos mapas do presente trabalho com aqueles do Atlas Brasileiro de Energia Solar, foi empregada a mesma escala para visualização dos dados.

Através da elaboração dos mapas, com a estimativa de dados para toda a extensão territorial do estado através da interpolação simples, foi possível detectar a radiação média, mínima e máxima para cada cenário. Tais dados se encontram ilustrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Radiação mensal, sazonal e anual (mínima, máxima e média) do estado

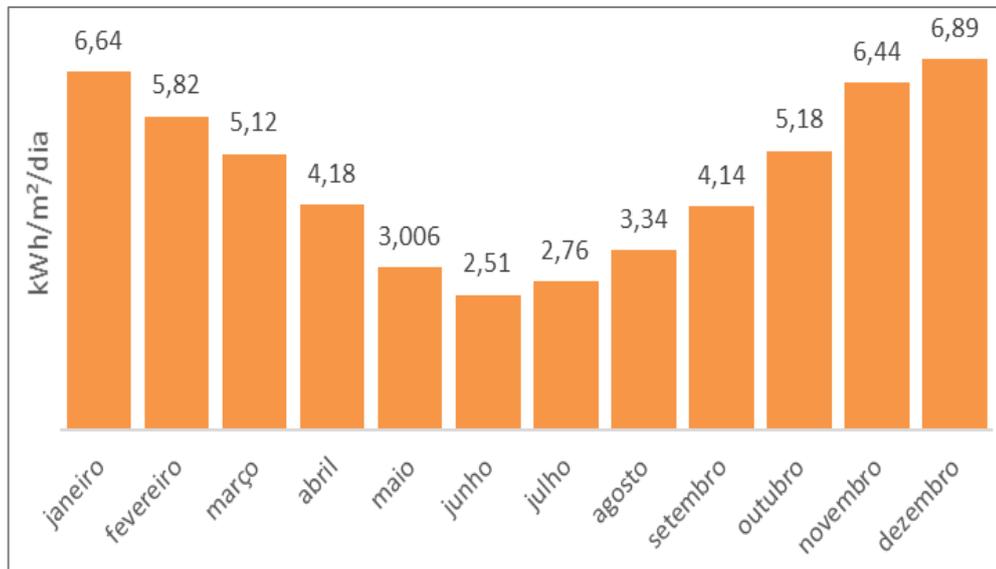
MAPAS		Radiação (kWh/m <sup>2</sup> /dia)		
		Mínima	Máxima	Média
ANUAL		4,36	5,01	4,67
SAZONAL	Dez-Fev	5,93	6,83	6,44
	Mar-Mai	3,83	4,45	4,1
	Jun-Ago	2,54	3,16	2,87
	Set-Nov	4,93	5,63	5,26
MENSAL	Janeiro	5,99	7,11	6,64
	Fevereiro	5,46	6,15	5,82
	Março	4,8	5,5	5,12
	Abril	3,85	4,54	4,18
	Mai	2,59	3,33	3,01
	Junho	2,27	2,75	2,51
	Julho	2,43	3,07	2,76
	Agosto	2,93	3,71	3,34
	Setembro	3,77	4,54	4,14
	Outubro	4,84	5,65	5,18
	Novembro	6,05	6,78	6,44
	Dezembro	6,14	7,53	6,89

Fonte: Autora (2017).

Com o intuito de verificar se as interpolações seguiram um padrão (e, com isso, avaliar previamente o software empregado), foram geradas as médias anuais por meio das médias sazonais e mensais expostas na Tabela 3. A média anual elaborada por intermédio dos dados sazonais foi de 4,67; aquela elaborada empregando os dados mensais, 4,67. Haja vista que ambas foram iguais ao valor gerado para o mapa anual, conclui-se que as diferentes interpolações realizadas não resultaram em maiores erros.

Com a finalidade de ilustrar visualmente a variação da média mensal ao longo do estado, gerou-se o gráfico ilustrado na Figura 22. Por meio do mesmo é possível depreender que as interpolações não alteraram o comportamento já apresentado pelas estações na elaboração de suas médias, isso é, alta variabilidade sazonal. As próximas páginas ilustram os mapas gerados.

Figura 22 – Média mensal de radiação global horizontal no RS



Fonte: Autora (2017).

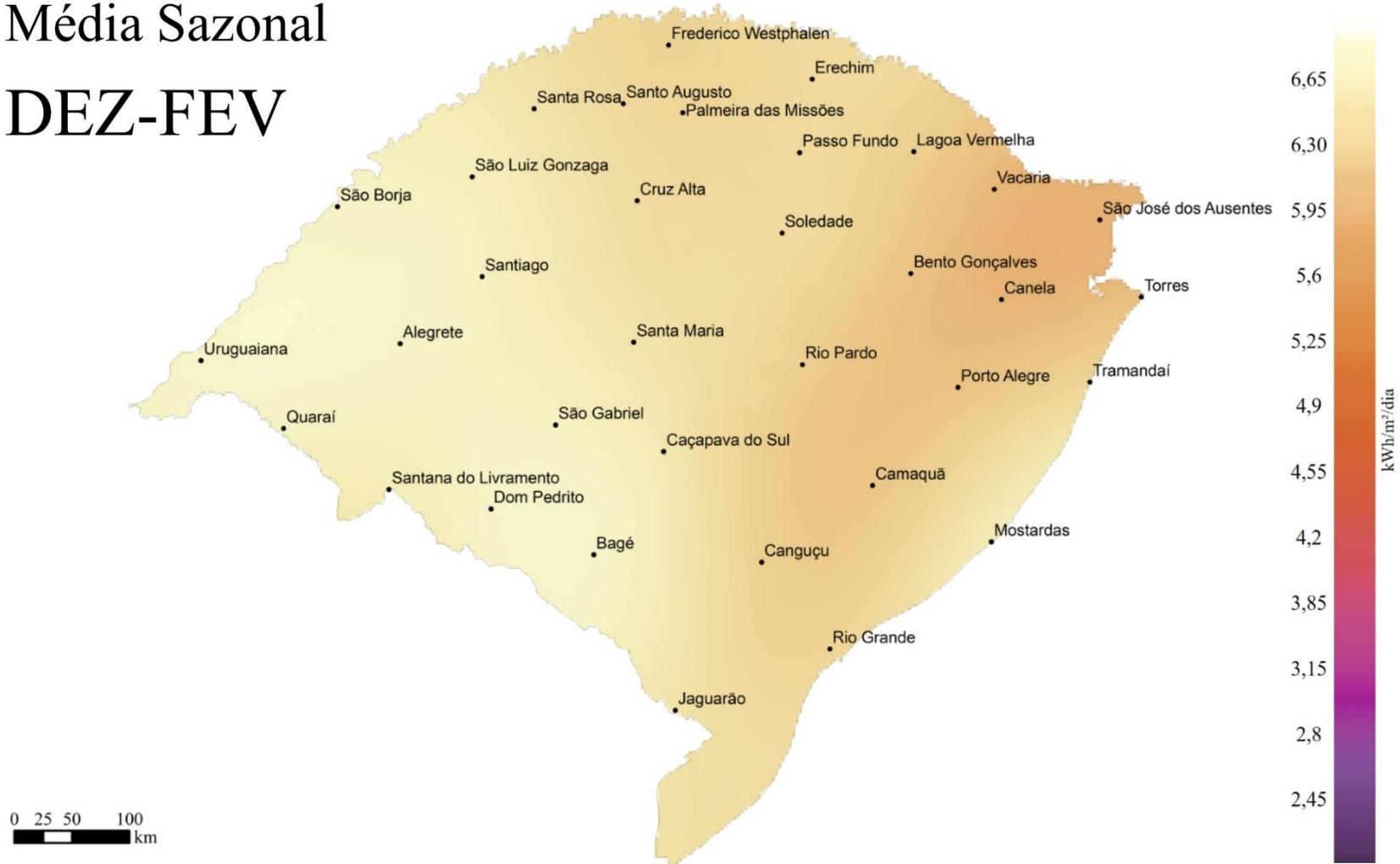
Figura 23 – Radiação solar média diária anual



Fonte: Autora (2017).

Figura 24 – Radiação solar média diária sazonal (verão)

# Média Sazonal DEZ-FEV



Fonte: Autora (2017).

Figura 25 – Radiação solar média diária sazonal (outono)

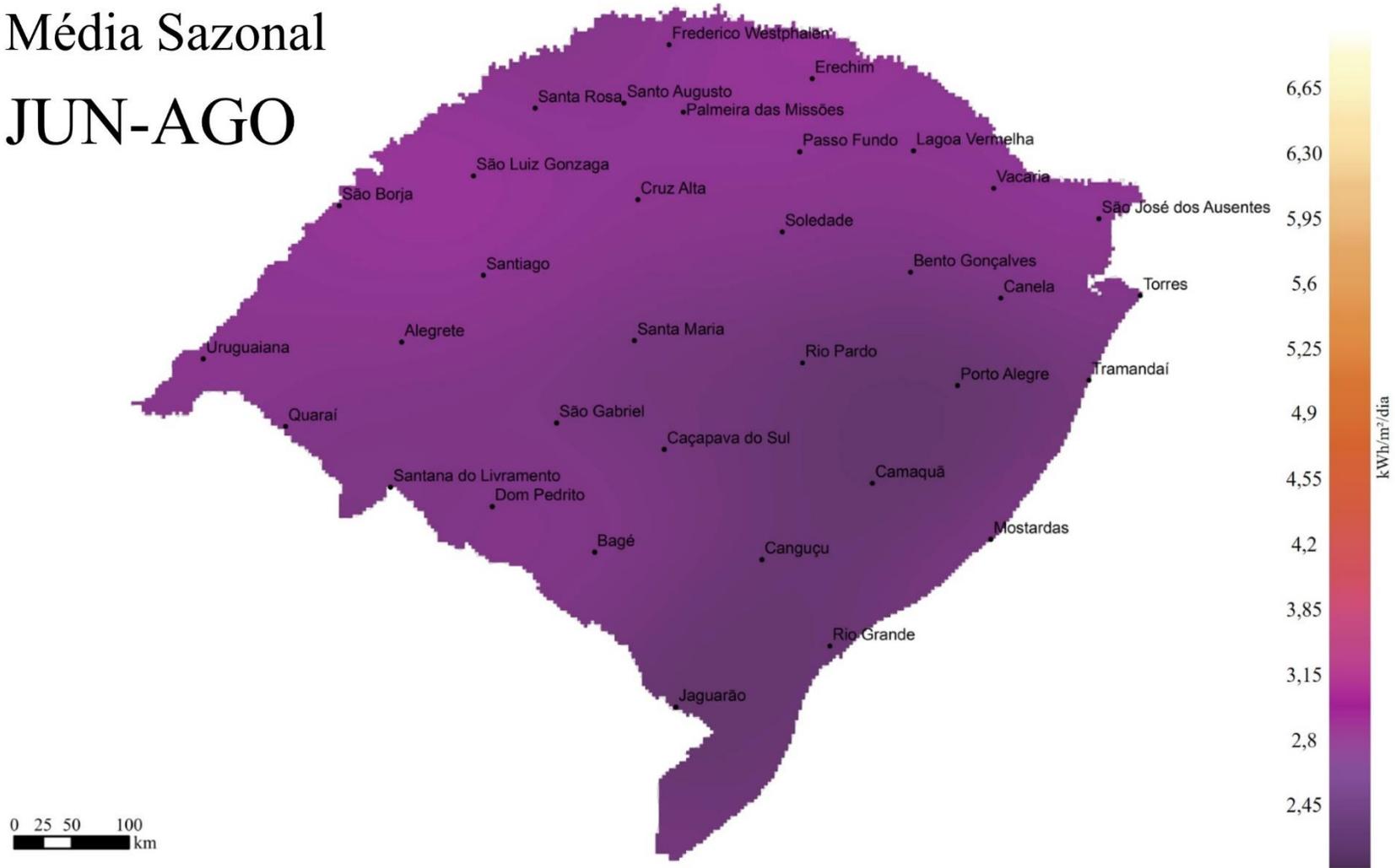
# Média Sazonal MAR-MAI



Fonte: Autora (2017).

Figura 26 – Radiação solar média diária sazonal (inverno)

# Média Sazonal JUN-AGO



Fonte: Autora (2017).

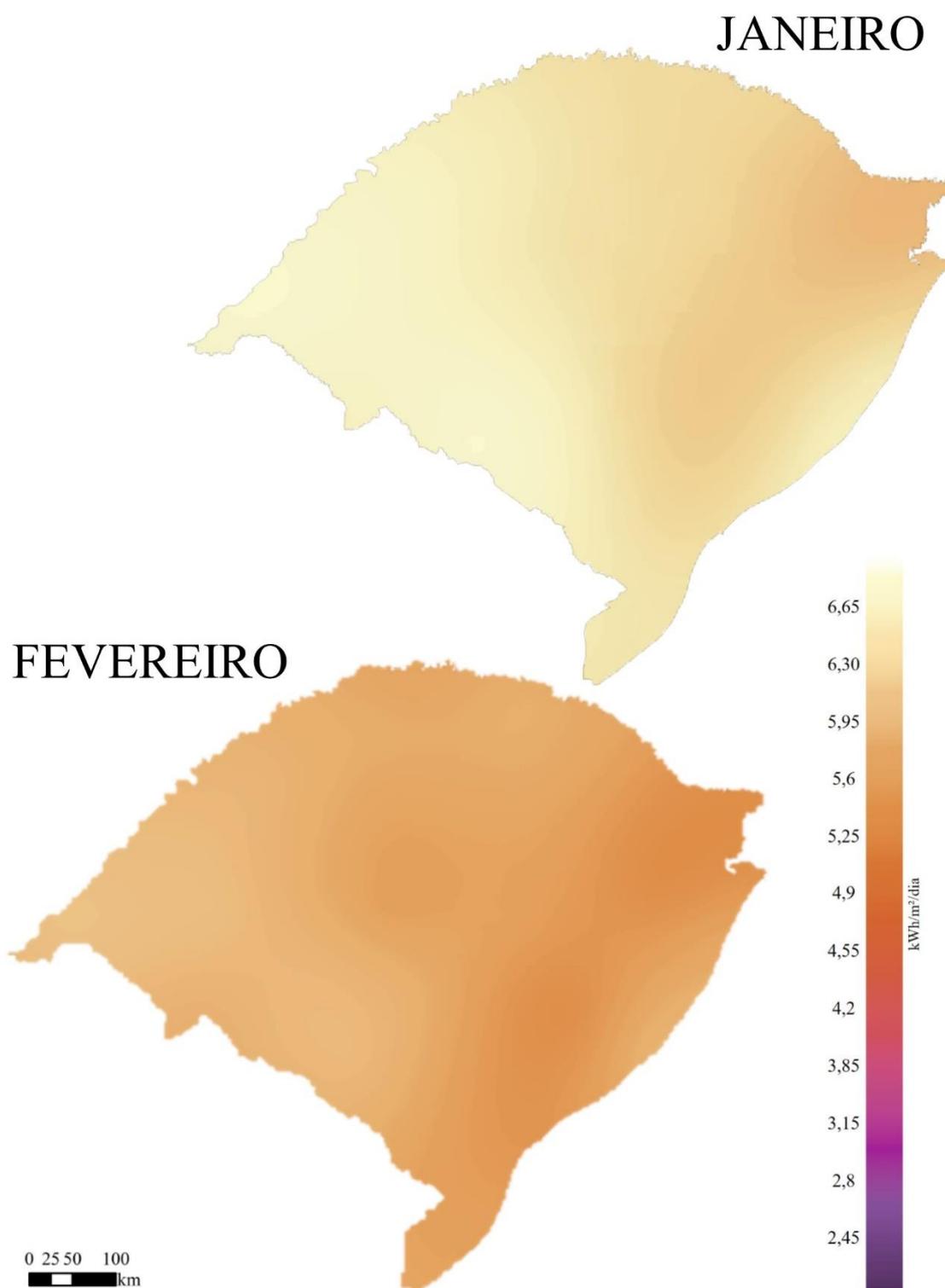
Figura 27 – Radiação solar média diária sazonal (primavera)

# Média Sazonal SET-NOV



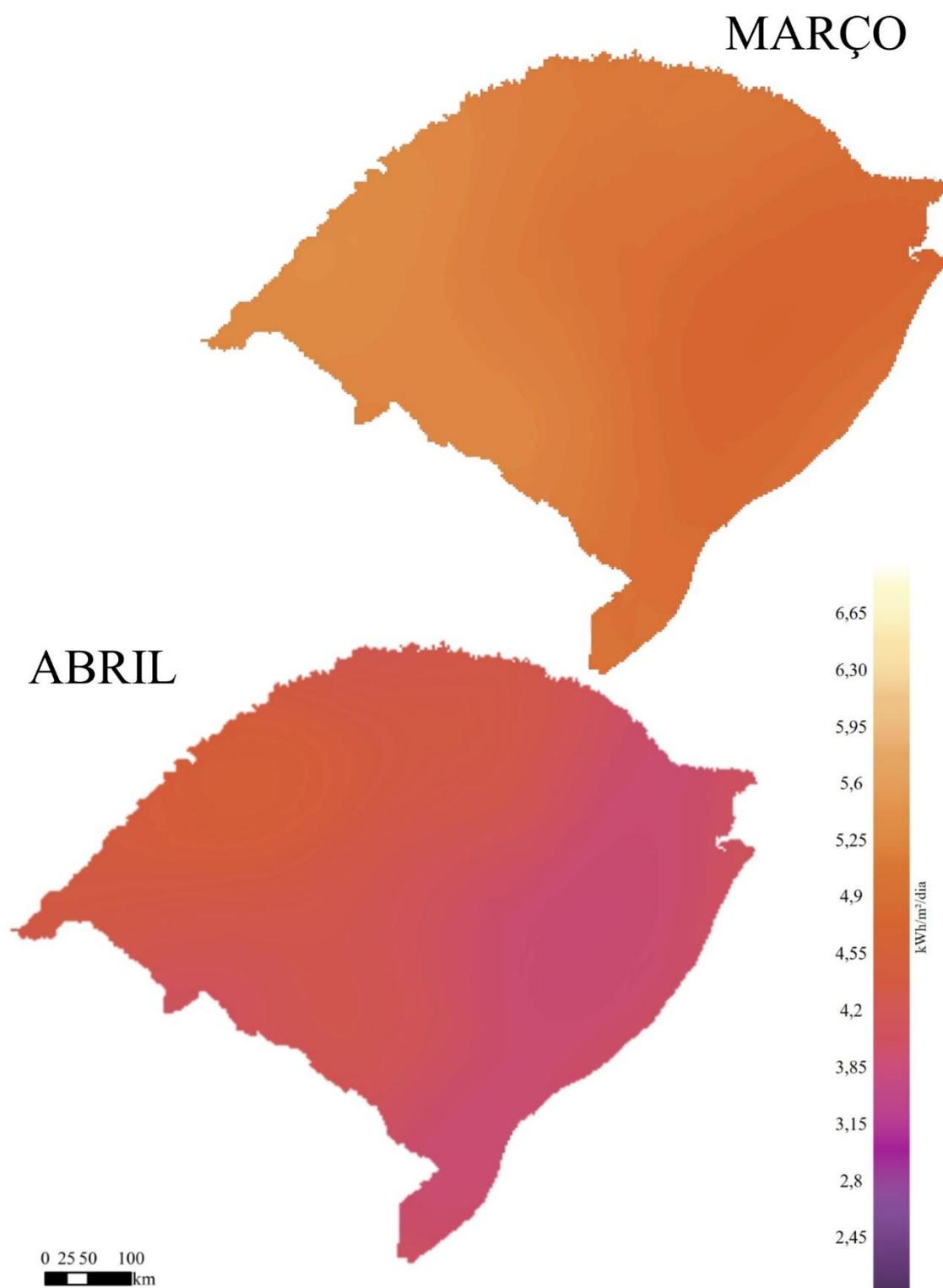
Fonte: Autora (2017).

Figura 28 – Radiação solar média diária mensal (janeiro e fevereiro)



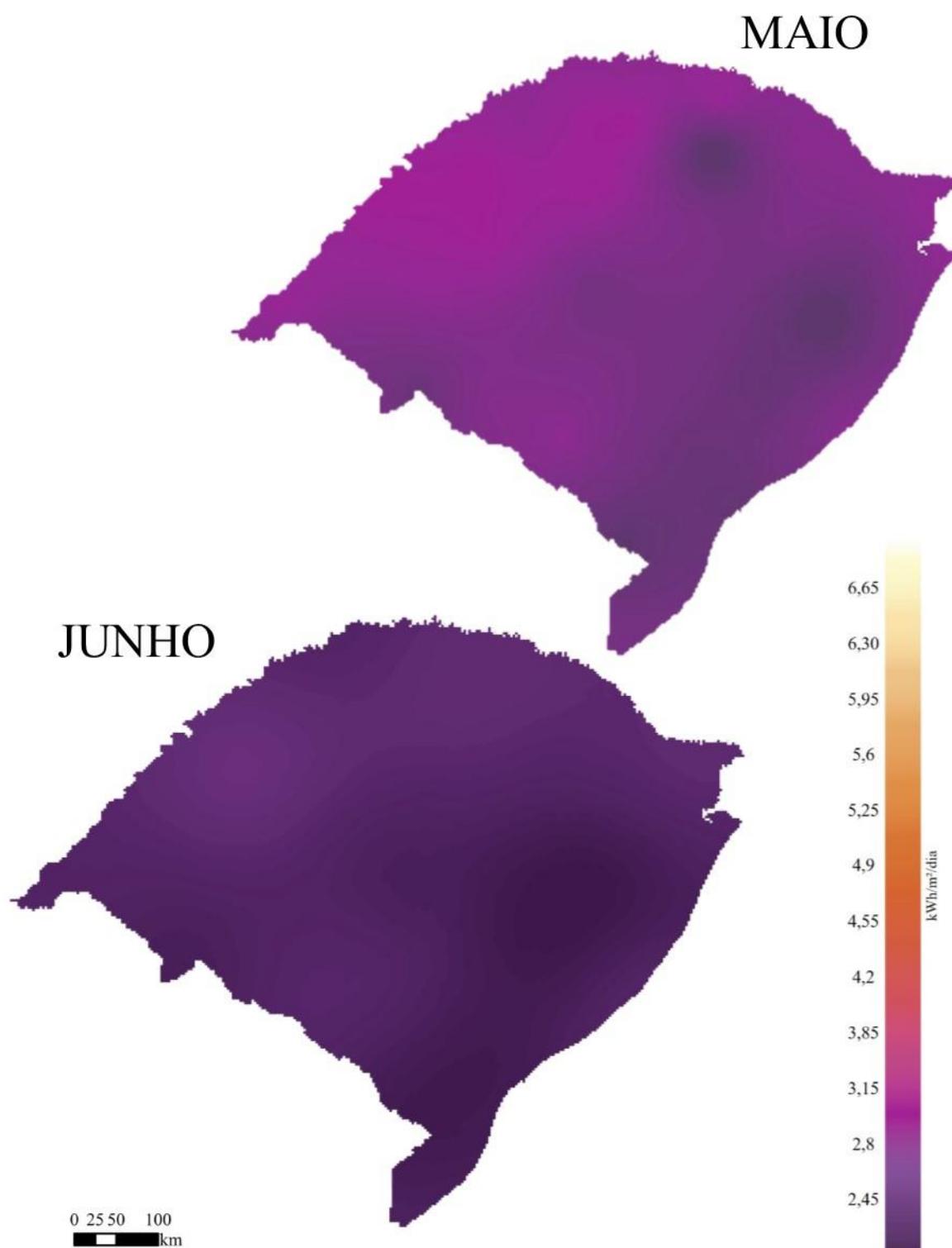
Fonte: Autora (2017).

Figura 29 – Radiação solar média diária mensal (março e abril)



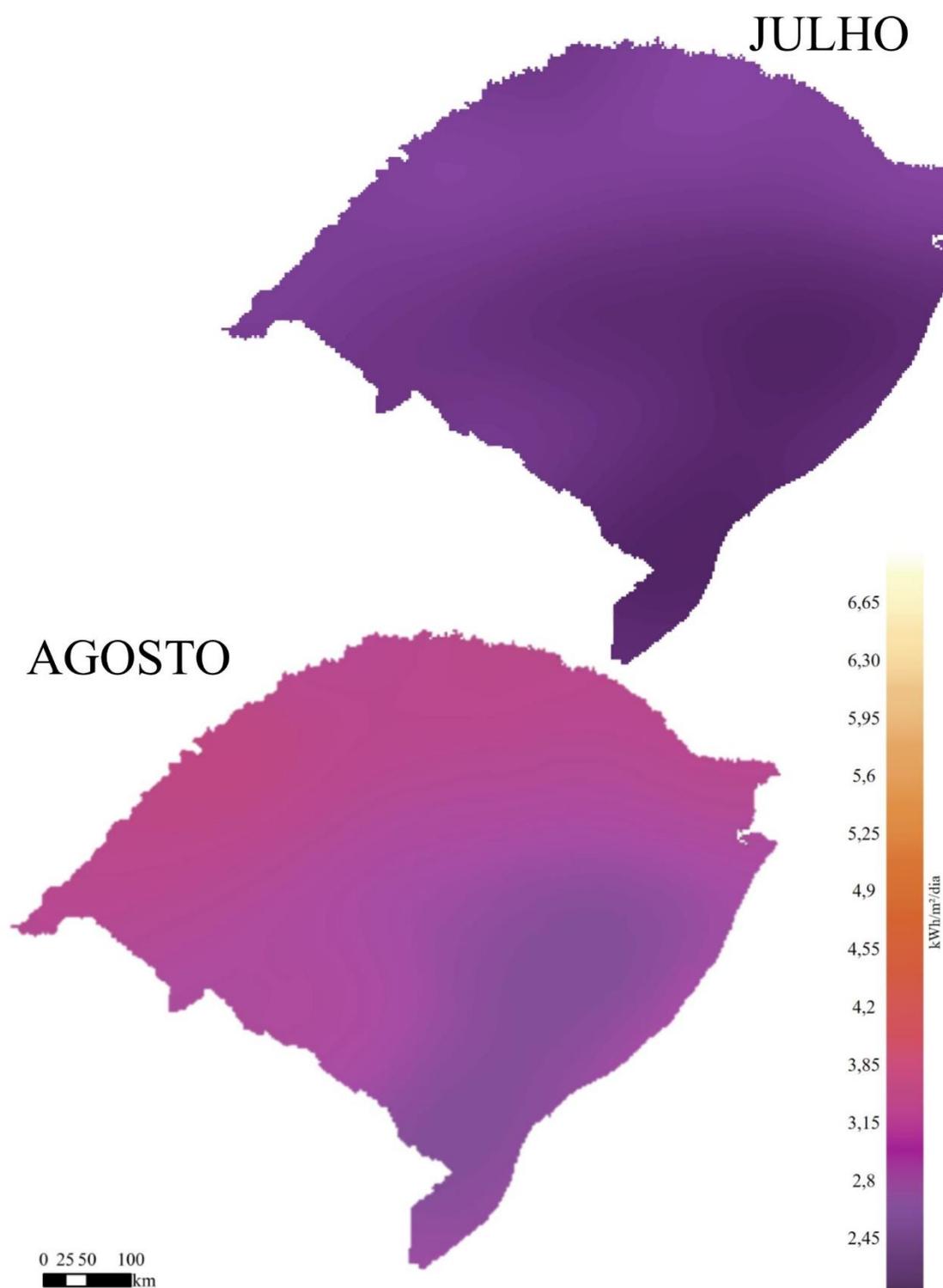
Fonte: Autora (2017).

Figura 30 – Radiação solar média diária mensal (maio e junho)



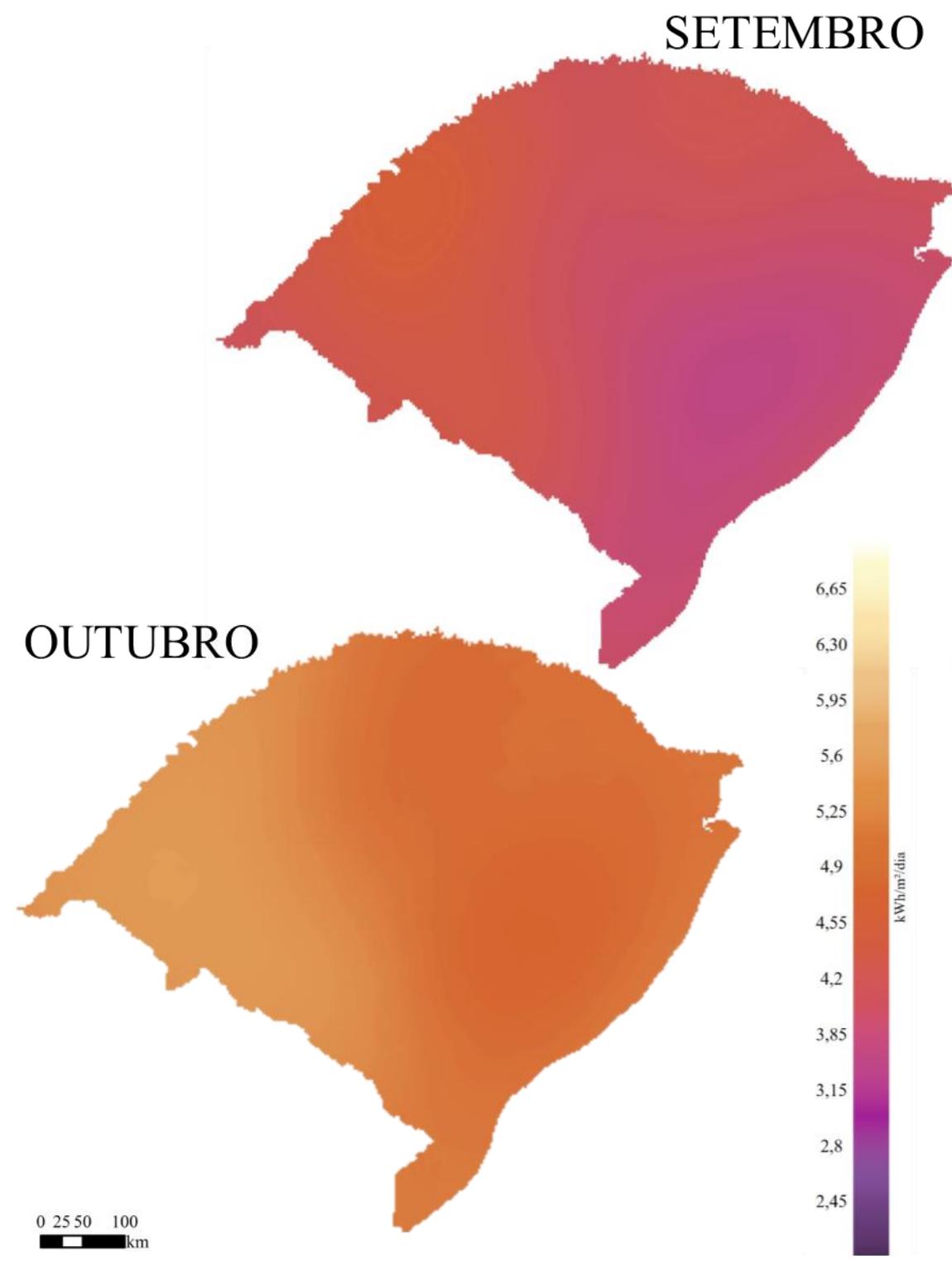
Fonte Autora (2017).

Figura 31 – Radiação solar média diária mensal (julho e agosto)



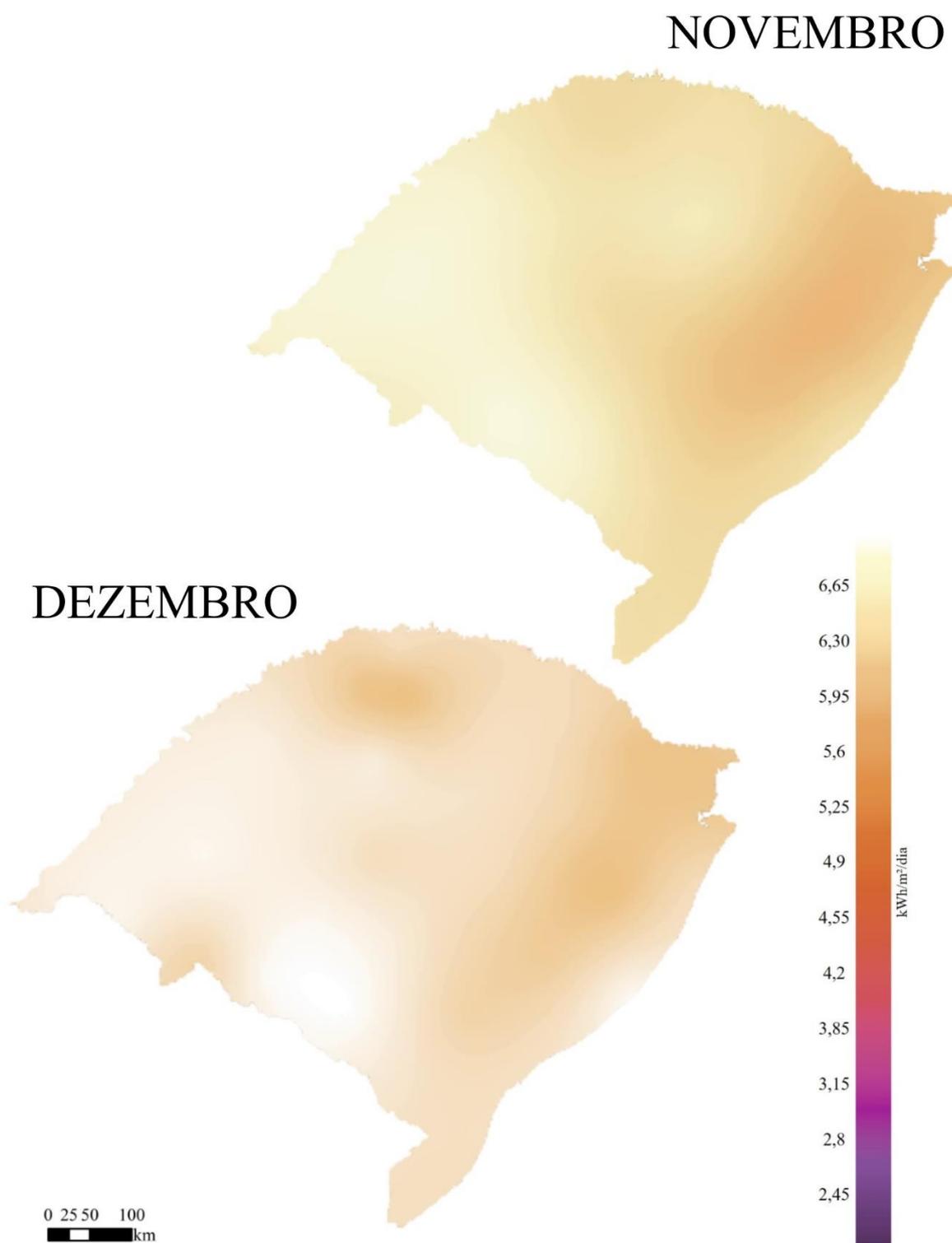
Fonte: Autora (2017).

Figura 32 – Radiação solar média diária mensal (setembro e outubro)



Fonte: Autora (2017).

Figura 33 – Radiação solar média diária mensal (novembro e dezembro)



Fonte: Autora (2017).

Visualmente, constata-se que todos os mapas gerados corroboraram com o esperado no sentido de evolução da radiação através dos meses e das estações. Através do recurso de validação cruzada (*cross-validation*) do software, fez-se possível a elaboração da Tabela 4, que ilustra diferentes erros relacionados à estimativa dos mapas.

Tabela 4 – Erros associados à interpolação

MAPA	Root-Mean-Square Error	Mean Standardized Error	Root-Mean-Square Standardized Error	Average Standard Error
ANUAL	0,167	-0,036	0,989	0,165
SAZONAL	Dez-Fev	0,214	1,002	0,208
	Mar-Mai	0,165	1,054	0,1554
	Jun-Ago	0,135	0,976	0,141
	Set-Nov	0,207	0,976	0,213
MENSAL	Janeiro	0,228	0,939	0,230
	Fevereiro	0,196	0,955	0,2
	Março	0,224	0,998	0,222
	Abril	0,211	1,194	0,182
	Mai	0,168	0,997	0,172
	Junho	0,138	0,967	0,141
	Julho	0,129	0,898	0,14
	Agosto	0,164	1,034	0,161
	Setembro	0,183	0,972	0,185
	Outubro	0,25	0,983	0,262
	Novembro	0,262	0,994	0,264
	Dezembro	0,302	1,046	0,294

Fonte: Autora (2017).

De acordo com o manual do ArcGIS, quando modelando o mapa, deve-se buscar a média padronizada (*Mean Standardized Error*) próxima de zero, o menor erro médio quadrático da estimativa (*Root-Mean-Square Error*), a média do desvio padrão (*Average Standard Error*) mais próxima do erro médio quadrático da estimativa; e o erro médio quadrático padronizado da estimativa (*Root-Mean-Square Standardized Error*) mais próximo de um (ESRI, 2001a).

Analisando a Tabela 4, portanto, é possível depreender que, apesar do trabalho ter partido da premissa de que empregaria um modelo standard de desenvolvimento dos mapas sem a comparação com diferentes modelos, todos os mapas gerados respondem às expectativas de qualidade apontadas pelo manual do ArcGIS.

Com a finalidade de que se fizesse possível visualizar a maneira com que os erros se dispersam ao longo dos mapas, foram gerados mapas de erros das estimativas (*standard prediction error*) para aqueles que deverão ser comparados aos mapas do Atlas Brasileiro de Energia Solar (anual e sazonais). Tais mapas se encontram ilustrados na Figura 34.

Figura 34 – Mapas do desvio padrão das estimativas (*prediction standard error maps*)(médias diárias anual e sazonais)

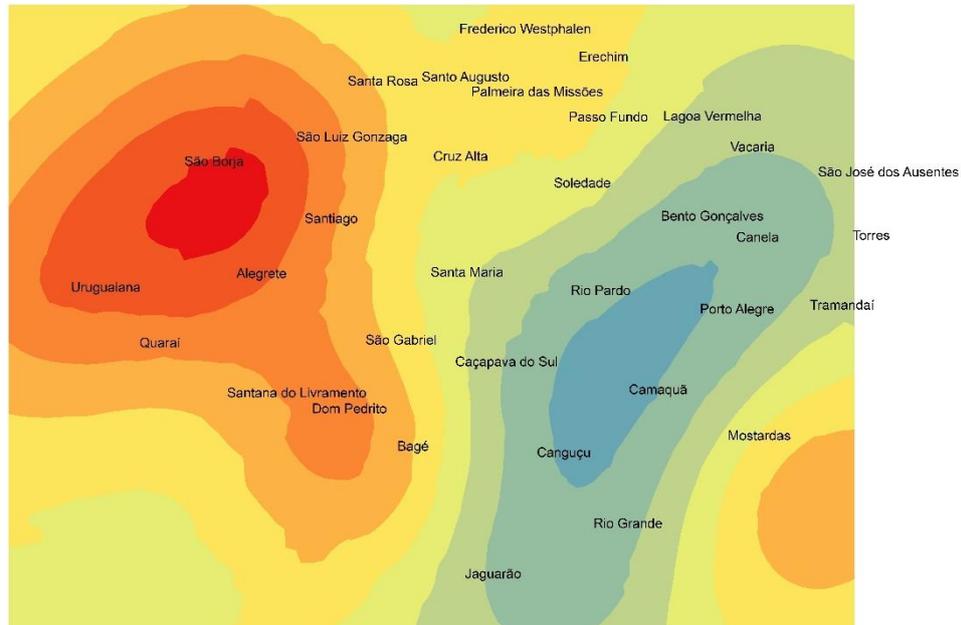


Fonte: Autora (2017).

Depreende-se da Figura 34 que os maiores erros associados às estimativas feitas pelo processamento dos dados se deram naqueles pontos com menor densidade de dados, isso é, naqueles pontos mais isolados, tais como o extremo sul do estado. Decorrem daí as diferenças relacionadas aos valores de *Average Standard Errors* dispostos na Tabela 4 e os erros dispostos nos mapas da Figura 34 (que são consideravelmente menores). Os erros ilustrados na Tabela 4 são oriundos do relatório da krigagem feita para a geração de cada um dos mapas. A aplicação da krigagem, no entanto, resulta em uma imagem retangular (conforme exemplo ilustrado na Figura 35). Portanto, os valores de *Average Standard Errors* na Tabela 4 estão sobredimensionados, haja vista que computam também aqueles pontos fora dos limites

territoriais do estado e que devem, por estarem distantes das estações, apresentar consideráveis distorções nos valores.

Figura 35 – Exemplo de obtenção do mapa via krigagem



Fonte: Autora (2017).

Em posse desse entendimento, foi possível, através da elaboração destes mapas ilustrados na Figura 34, verificar o erro médio de *prediction standard error* para tão somente a área delimitada pelos limites do estado: para o mapa anual, foi de 0,08 kWh/m<sup>2</sup>/dia, para os meses de verão, 0,1 kWh/m<sup>2</sup>/dia, para os meses de outono, 0,07 kWh/m<sup>2</sup>/dia, para os meses de inverno, 0,07 kWh/m<sup>2</sup>/dia e, finalmente, para os meses de primavera, 0,1 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

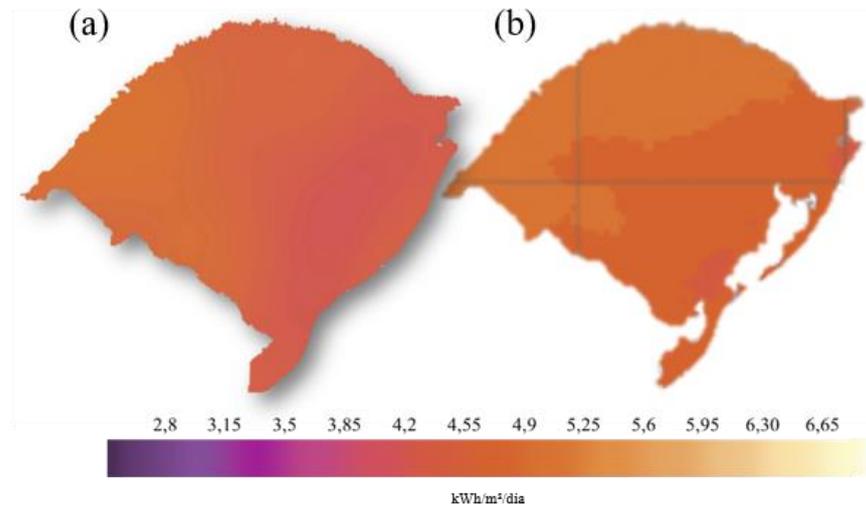
Por meio desta constatação, é possível depreender que as médias do desvio padrão das estimativas (de acordo com os mapas ilustrados na Figura 34 em contraste com os dados da Tabela 3) representam, aproximadamente, 1,7% para o mapa anual; 1,6% para o mapa de verão; 1,7% para o mapa de outono; 2,4% para o mapa de inverno; e, por fim, 1,9% para o mapa de primavera.

#### 6.4. Comparação com o Atlas Brasileiro de Energia Solar

Com a finalidade de verificar a aproximação ou não dos mapas elaborados com aqueles que são parâmetros para a elaboração de estudos solares, bem como para a implementação de tecnologias de conversão de energia solar, buscou-se comparar os mapas elaborados com os

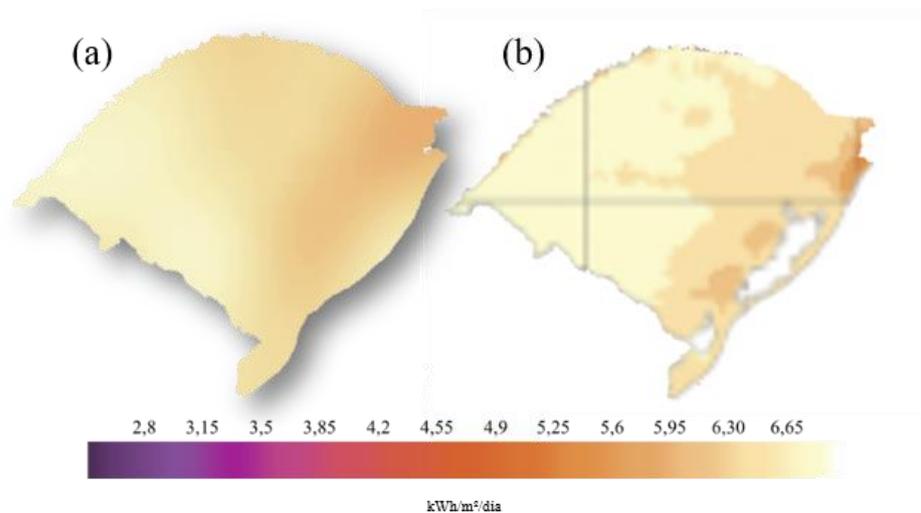
mapas do Atlas Brasileiro de Energia Solar – já descritos em capítulos introdutórios. A escala de cor atribuída na legenda dos valores dos dados no presente projeto foi elaborada em acordo com a escala empregada por estes mapas, com a finalidade de que se facilitasse a execução de tal comparação<sup>6</sup>, onde (a) ilustra o mapa do presente trabalho; e (b), o mapa do INPE.

Figura 36 – Comparação dos mapas referentes à média diária anual de radiação solar. Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE



Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2006) e Autora (2017).

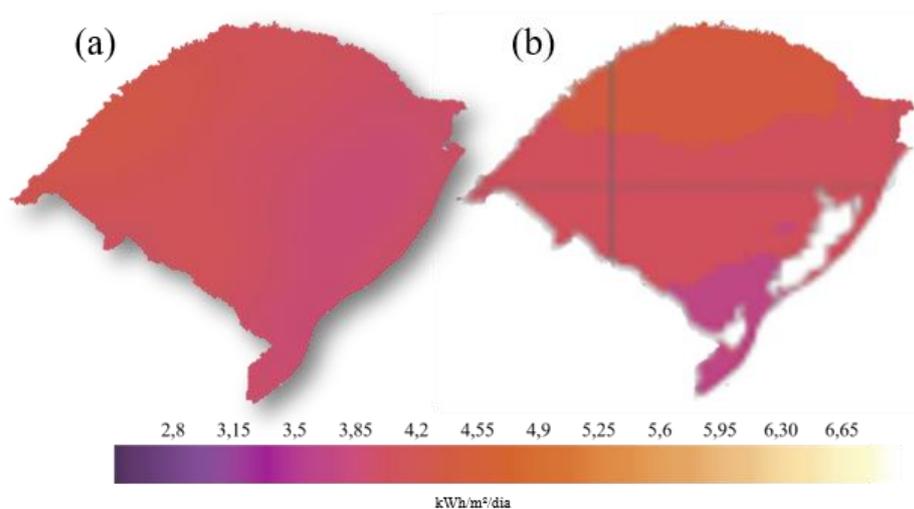
Figura 37 – Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (verão). Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE



Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2006) e Autora (2017).

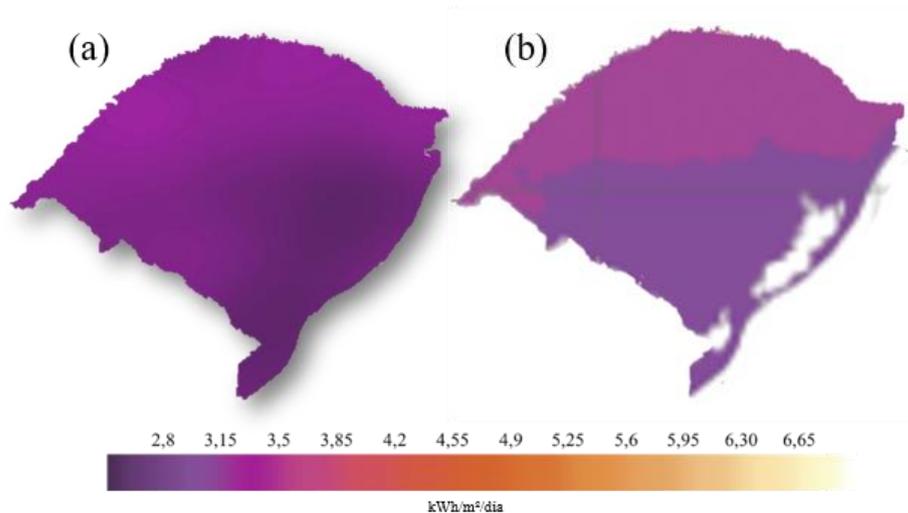
<sup>6</sup> É importante destacar, no entanto, que, ao contrário do presente projeto que apresenta médias do dia médio do mês, os mapas do INPE apresentam médias anuais do total diário de radiação solar global incidente e, portanto, unidade de kWh/m<sup>2</sup> nos dados e não kWh/m<sup>2</sup>/dia.

Figura 38 – Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (outono). Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE



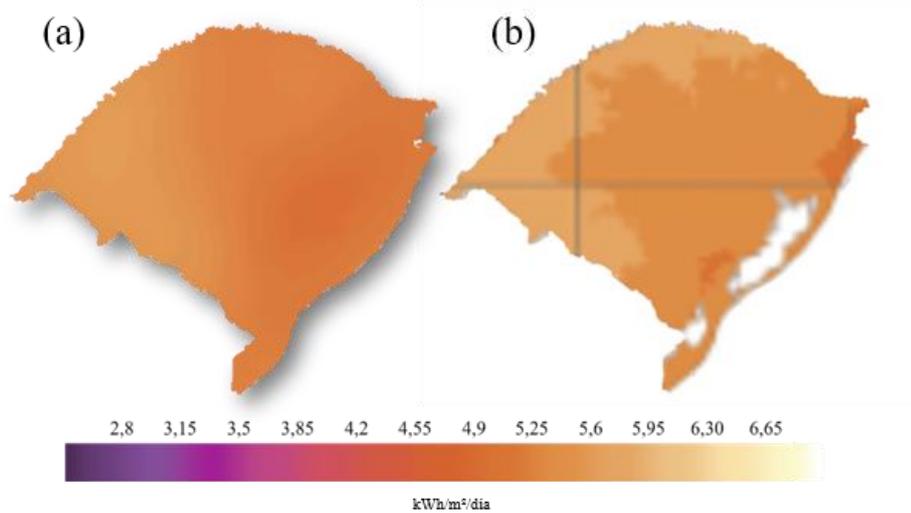
Fonte: Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2006) e Autora (2017).

Figura 39 – Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (inverno). Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE



Fonte: Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2006) e Autora (2017).

Figura 40 - Comparação dos mapas referentes à média diária sazonal de radiação solar (primavera). Onde (a) é o mapa produzido pelo presente projeto e (b) o mapa do INPE



Fonte: Adaptado de PEREIRA et al. (2006) e Autora (2017).

Observam-se a partir de tais comparações comportamentos muito semelhantes nos mapas realizados pelo presente projeto e pelo INPE. Em geral, as da metade oeste e metade norte são aquelas que apresentam as maiores incidências de radiação global horizontal ao longo de todo o ano. No entanto, os resultados obtidos no presente projeto, com exceção do mapa sazonal de inverno, ilustram maiores incidências na metade oeste do que na metade norte, enquanto os mapas do INPE ilustram incidências maiores ou iguais na metade norte quando comparada à oeste.

A metade sul e metade leste se tratam das regiões com menores incidências de radiação global durante o ano, sendo a região metropolitana aquela com os menores índices de radiação para os mapas anual e sazonais elaborados pelo presente projeto (com exceção do mapa de verão). Para os mapas do Atlas Brasileiro, o mesmo comportamento para a metade leste e sul é observado, no entanto, os mapas com as estimativas apresentam alguns pontos relativamente isolados com as mínimas observadas: no mapa anual, a região próxima à estação de Rio Grande; no de verão, uma pequena região próxima à estação de Torres; no de outono, região do extremo sul do estado; e no de primavera, dois pontos afastados, sendo um deles a região próxima à estação de Torres, e o outro próximo à Canguçu.

De maneira geral, os mapas produzidos pelo presente projeto apresentam valores de radiação global menores do que aqueles ilustrados nos mapas do INPE. Enquanto o menor valor de radiação global ilustrado no mapa no segundo é de 2,8 kWh/m²/dia; no presente projeto é de 2,54 kWh/m²/dia. Ademais, enquanto a radiação global média admitida pelo INPE é de 5,2

kWh/m<sup>2</sup>/dia para toda região sul, o presente projeto verificou uma média anual de 4,67 kWh/m<sup>2</sup>/dia para o estado.

## 7 CONCLUSÃO

Seja pelas expectativas de criação de empregos, pela redução de emissão de poluentes em sua cadeia de produção ou pela criação de um novo mercado econômico, as energias renováveis vêm, sob a nova concepção de desenvolvimento enquanto um modelo sustentável, ganhando importância na matriz energética brasileira e mundial. Nesse mesmo sentido, a energia solar, ainda que mais lentamente, vem também ganhando importância na matriz energética brasileira desde a implementação da Resolução 482 da ANEEL.

O estado do Rio Grande do Sul, por sua vez, aparenta reunir condições favoráveis para a inserção desse novo modelo de geração de energia – sejam elas econômicas, sociais ou ambientais – uma vez que se destacou em terceiro lugar nacional em número de conexões em 2016 e quinto em potência instalada. Nesse sentido, levando-se em conta a importância da disponibilidade de informações referentes à disponibilidade de recursos para aqueles interessados em investir em tecnologias de conversão da energia solar, o presente projeto visou elaborar mapas solarimétricos para o estado através de dados referentes à incidência de radiação global, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Haja vista que a metodologia escolhida para a geração dos mapas foi a da interpolação krigagem de todas as médias mensais, sazonais e anual dos municípios em que se localiza uma estação de coleta de dados, uma importante etapa do projeto foi a de tratamento dos mesmos. Isso porque, uma vez que a krigagem estima valores para todos os pontos do mapa com base naqueles de entrada, poderiam ser estimados valores incoerentes que afetariam a aplicabilidade dos mapas. Através do correto preenchimento dos dados faltantes nas séries temporais de todos os municípios, da verificação de todos os dados incoerentes, da verificação do número mínimo de anos para a validação da série temporal e da verificação das datas e horários contidos nas planilhas, fez-se possível a geração das médias diárias mensais, anuais e sazonais de radiação global de todos os municípios.

Finalmente, através do software ArcMap, foram gerados os mapas mensais, sazonais e anual. Através da verificação dos erros associados com a estimativa da interpolação, constatou-se que, ainda que tenham sido gerados através do método default do programa, os mesmos apresentaram uma representação aceitável do fenômeno. Para o mapa de média diária anual de radiação global, os erros representaram 1,7% da média; para o mapa de verão, 1,6%; para o mapa de outono, 1,7%; para o mapa de inverno, 2,4%; e, por fim, para o mapa de primavera, 1,9%. Entende-se que tais erros possam ser oriundos da coleta de dados, em razão dos erros

associados aos piranômetros empregados, Eppley PSP que, por serem instrumentos de primeira classe, apresentam precisão de 2% a 5%, valores muito próximos ao percentual da média do desvio padrão das estimativas nos mapas. Ademais, nenhum tratamento do fenômeno de compensação térmica diurna foi avaliado, levando a, ainda que possivelmente insignificantes, distorções nas médias elaboradas.

Uma vez comparados com os mapas do Atlas Brasileiro de Energia Solar, observou-se que, de maneira geral, os mesmos se comportam de forma

semelhante; no entanto, os mapas gerados pelo presente projeto ilustraram valores mais baixos de radiação global horizontal do que aqueles do Atlas.

Para fins de atender às demandas que justificam e motivaram a elaboração do presente projeto, todos os dados tratados conforme metodologia exposta no corpo do trabalho serão disponibilizados para a comunidade em geral.

Espera-se, por fim, que mais estudos sejam viabilizados através do encaminhamento do presente projeto, bem como se espera que os mapas aqui elaborados possam vir a auxiliar no campo acadêmico de pesquisa e, sobretudo, no campo prático, para fins de dimensionamento de sistemas de aplicação de conversão de energia solar.

## **8 FUTUROS PROJETOS**

Entende-se que, através dos dados tratados disponibilizados à toda comunidade acadêmica, far-se-á possível, futuramente, a elaboração de maiores estudos relacionados à radiação solar no estado. Dentre estes, a realização do processamento das médias de irradiação solar total inclinada e direta normal e a elaboração de mapas solarimétricos com a mesma base metodológica empregada no presente projeto; a realização de uma análise acerca das características espectrais da radiação medida; a obtenção de um indicador relacionado à produtividade fotovoltaica no estado; e, sobretudo, a publicação de todas as informações para aqueles interessados em investir no setor.

## REFERÊNCIAS

ALSAMAMRA, H. et al. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 8, p. 1343–1357, 2009.

ARCGIS. **ArcMap**. Disponível em:

<<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm>>. Acesso em 18 maio. 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Unidades Consumidoras com Geração Distribuída. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset\\_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_mJhnKli7qcJG%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D2](http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mJhnKli7qcJG%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2)> Acesso em maio de 2017.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético nacional 2016**: Ano base 2015. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. INMET. Nota técnica nº. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET: **Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. 2011. Disponível em:

<[http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo\\_iframe/pdf/Nota\\_Tecnica-Rede\\_estacoes\\_INMET.pdf](http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf)>. Acesso em 18 de maio. 2017.

CAPELETTO, G. J; ZANCHI, H. G; CEEE; SME. **Balanco Energético do Rio Grande do Sul 2015**: ano base 2014. Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em:

<[http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Balanco\\_Energetico\\_RS\\_2015\\_base\\_2014\\_61962.pdf](http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Balanco_Energetico_RS_2015_base_2014_61962.pdf)>. Acesso em 18 maio. 2017.

COLLE, S; PEREIRA, E. **Atlas de irradiação solar do Brasil**: (1a versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície). Brasília, DF, 1998. Disponível em:<[https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/05/atlas\\_de\\_irradiacao.pdf](https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/05/atlas_de_irradiacao.pdf)>. Acesso em 18 de maio. 2017.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/Atlas\\_Solarimetrico\\_CEMIG\\_12\\_09\\_menor.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/Atlas_Solarimetrico_CEMIG_12_09_menor.pdf)>. Acesso em 18 maio 2017.

CUNHA, R.; PRATES, C. P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. **BNDES Setorial**, n. 21, p. 5–30, 2005.

DINÇER, F. The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 713–720, 2011.

ESRI. **ArcGIS9**: Using ArcGIS Geostatistical Analyst. 2001a. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjv7OILgrnUAhUL15AKHfTNBbcQFgg6MAM&url=http%3A%2F%2Fhelp.arcgis.com%2Fen%2Farcgisdesktop%2F10.0%2Fpdf%2Fgeostatistical-analyst-tutorial.pdf&usq=AFQjCNGkrAosdNQCzpYIOff3seWt1EV\\_nQ&sig2=6TwBPBLNAQpCzH6IPPJcow](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjv7OILgrnUAhUL15AKHfTNBbcQFgg6MAM&url=http%3A%2F%2Fhelp.arcgis.com%2Fen%2Farcgisdesktop%2F10.0%2Fpdf%2Fgeostatistical-analyst-tutorial.pdf&usq=AFQjCNGkrAosdNQCzpYIOff3seWt1EV_nQ&sig2=6TwBPBLNAQpCzH6IPPJcow)> Acesso em 18 maio 2017.

ESRI. **Cross Validation**. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/geostatistical-analyst-toolbox/cross-validation.htm>> Acesso em 18 maio 2017.

GUARNIERI, R. et al. **Avaliação de estimativas de radiação solar incidente e baseadas em extrapolação e interpolação na região sudeste do Brasil**. Florianópolis (SC): Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), 2006. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-e597518474e11df5c5e75ddf6975964d.pdf>>. Acesso em 18 maio 2017.

GUEYMARD, C. A.; MYERS, D. R. Performance assessment of routine solar radiation measurements for improved solar resource and radiative modeling. In: Annual ASES Conference, Cleveland, OH, 2007. **Solar 2007**, American Solar Energy Society, 2007. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/236314658\\_Performance\\_assessment\\_of\\_routine\\_solar\\_radiation\\_measurements\\_for\\_improved\\_solar\\_resource\\_and\\_radiative\\_modeling](https://www.researchgate.net/publication/236314658_Performance_assessment_of_routine_solar_radiation_measurements_for_improved_solar_resource_and_radiative_modeling)>. Acesso em 18 de maio 2017.

HAAG, R; KREZINGER, A; STOFFEL; T. **Análise preliminar do “offset” térmico em piranômetros sob diferentes condições atmosféricas**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 2, n. 2, p. 89-97, 2011.

IEA. **Key World Energy Statistics**. 2016. Disponível em: <<http://www.oecd.org/publications/key-world-energy-statistics-22202811.htm>>. Acesso em 18 de maio 2017.

MARTINAZZO, C. A. **Modelos De Estimativa De Radiação Solar Para Elaboração De Mapas Solarimétricos**. Porto Alegre, 2004. 210f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. **Solar Energy**, v. 81, n. 4, p. 517–528, 2007.

MICHALSKY J.J. et al. Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors. **Solar Energy**, v. 54, p. 397-402, 1995.

MYERS, D. R. **SOLAR RADIATION: Practical Modeling for Renewable Energy Applications**. New York: CRC Press, 2013. 199 p.

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 3, p. 1513–1524, 2011

PEREIRA, E.B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 1.ed. São José dos Campos: INPE, 60 p., 2006.

PEREZ, R.; SEALS, R.; ZELENKA, A. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. **Solar Energy**, v. 60, n. 2, p. 89–96, 1997.

SANCHEZ, G. et al. **Pyranometer Thermal Offset: Measurement and Analysis**, v.34, n.6, 2015. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JTECH-D-14-00082.1>> Acesso em maio de 2017.

SANTOS, R. **Aplicação do método de kriging para estimar campos de radiação solar: um estudo para o nordeste do brasil**. São José dos Campos, 2014. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, 2014.

SCHÜLER, D. et al. The enerMENA meteorological network: Solar radiation measurements in the MENA region. In: **SOLARPACES 2015: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems**, p. 150008-1–150008-9, 2016.

SEBEM, E. **Geoestatística**. Disponível em: <[http://200.132.36.199/elodio/downloads/ppgap/Geoestatistica\\_AP\\_06.pdf](http://200.132.36.199/elodio/downloads/ppgap/Geoestatistica_AP_06.pdf)> Acesso em 18 de maio 2017.

Solar Energy Centre e Indian Meteorological Department. **Solar Radiation Hand Book**. 2008. Disponível em: <<http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/srd-sec.pdf>> Acesso em maio 2017.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. UFP: Pernambuco, 2000. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)>. Acesso em 18 de maio 2017.

WALD, L. Solar Radiation Energy (Fundamentals). In: GALVÉZ, J. B, et al. **Solar energy conversion and photoenergy systems**, Spain: EOLSS, 2010.