

ELABORAÇÃO DE MAPAS SOLARIMÉTRICOS PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL ATRAVÉS DO TRATAMENTO E INTERPOLAÇÃO DE DADOS ORIUNDOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Raiana Schirmer Soares – raianaschirmer@gmail.com
Geórgia Andrade Tomaszewski – g_atomaszewski@hotmail.com
Rafael Haag – rafael-haag@uergs.edu.br
Grupo de Pesquisa em Radiação Solar e Ciências Atmosféricas
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Resumo. Por responder às expectativas de desenvolvimento sustentável, a produção científica que vise fomentar o investimento em tecnologias de conversão de energia solar é imprescindível. Nesse sentido, o presente projeto teve como objetivo a geração de mapas solarimétricos de médias diárias sazonais e anual de radiação global horizontal para o estado do Rio Grande do Sul por meio de dados oriundos de 34 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 qualificá-los e aplicar rotinas de verificação e correção sobre os dados coletados. 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 e sazonal para a estações. Optou-se pela interpolação através da krigagem simples para a estimativa dos valores de radiação para a grade gerada no mapa. A média diária anual mínima foi de 4,36 kWh/m²/dia; a máxima, 5,01 kWh/m²/dia; e a média, 4,67 kWh/m²/dia. Concluiu-se a partir dos coeficientes de determinação e correlação que os erros associados à estimativa dos mapas são menores que 2,4% para as médias sazonais e 1,7% para a média anual.

Palavras-chave: Radiação Solar, Mapa Solarimétrico, Interpolação Kriging.

1. INTRODUÇÃO

Para além das questões ambientais, políticas públicas de desenvolvimento sustentável respondem em igual importância a interesses econômicos e sociais. Socialmente, as energias renováveis – com exceção da hidroeletricidade – geram mais empregos diretos do que os combustíveis fósseis e, além disso, respondem às demandas e disponibilidades locais de recursos energéticos (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, além de complementar a geração hidrelétrica, fomenta um mercado em recente ascensão.

No Rio Grande do Sul, o “uso da energia solar fotovoltaica é pequeno (...) 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 que “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica” (ANEEL, 2012, p. 1), o Rio Grande do Sul vem apresentando papel de destaque no setor. Tal afirmação pode ser constatada por meio do número de conexões e da potência instalada em cada estado brasileiro até o fim de 2016, que posicionam o Rio Grande do Sul, em contraste com os demais estados brasileiros, em terceiro lugar em relação à quantidade de instalações e em quinto lugar em relação à potência instalada até a data. Além disso, apesar de a geração distribuída ser aplicável às demais fontes de energia renováveis e à cogeração qualificada, tanto no Brasil quanto no estado do Rio Grande do Sul, as usinas fotovoltaicas são as grandes responsáveis pelo seu avanço – 99% das instalações de geração distribuída no estado são usinas fotovoltaicas – indicando, portanto, 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.

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 como o Brasil. Nesse sentido, 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. A luz dessa justificativa, o presente projeto teve como objetivo geral a elaboração de mapas solarimétricos sazonais e anual para o estado do Rio Grande do Sul por meio da interpolação dos dados de radiação global horizontal de 34 estações meteorológicas do INMET dispostas no estado.

2. 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 34 municípios do Rio Grande do Sul, conforme ilustrado no mapa da Figura 1.



Figura 1 – Estações meteorológicas automáticas do INMET empregadas no estudo

2.1 Radiação Global Horizontal

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.

2.2 Instrumentos utilizados na coleta dos dados de radiação global

Os dados de radiação global horizontal utilizados para na elaboração deste trabalho foram obtidos por meio do uso de piranômetros termoelétricos *Eppley*, modelo *PSP* (*Precision Spectral Pyranometer*) com incertezas no valor medido menores que 5% (Wilcox e Myers, 2008). A figura 2 ilustra o equipamento que é adotado em todas as estações automáticas no INMET analisadas.



Figura 2 – Ilustração do piranômetro Eppley PSP
Fonte: Eppley Lab (2017)

3. METODOLOGIA

3.1 Tratamento dos Dados

A etapa inicial para a condução do presente trabalho foi a de verificação dos dados de irradiação global horizontal obtidos a partir das estações automáticas do INMET. Para tanto, a planilha de cada um dos municípios contendo a série temporal dos dados coletados foi avaliada, com a finalidade de que fossem verificados eventuais desvios, lacunas ou falhas não previstas. A etapa de tratamento previu 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 et al, 2016).

- *Gaps* de até três horas consecutivas foram interpolados com os valores medidos mais próximos. As interpolações levaram em consideração somente os dados originais e válidos das planilhas, isso é, aqueles *gaps* maiores que uma hora não levaram em consideração no cálculo os valores já interpolados.
- *Gaps* de três horas a quatro dias foram preenchidos por meio da média dos valores mais próximos (até 96 horas distantes) para os mesmos horários. No caso dos dados mais próximos também conterem *gaps*, foi empregada a metodologia para dados faltantes por mais de 4 dias descrita a seguir.
- *Gaps* maiores que 4 dias foram 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, foi empregado, ao invés da média, apenas o valor do ano anterior ou seguinte.

Uma vez preenchidos os *gaps* de dados, foi realizada a análise das séries temporais de todos os municípios, com a finalidade de que fossem verificadas possíveis não-conformidades nos dados e traçadas as medidas corretivas para a condução das próximas etapas metodológicas. Os dados sobre o valor da componente global horizontal da radiação solar existentes nas planilhas foram inicialmente validados a partir de testes de qualidade que verificam se o valor apresentado é “*fisicamente possível*” ou “*extremamente raro*” (SCHÜLER et al., 2016) Além dos procedimentos de validação numéricos dos dados apresentados nas planilhas, foram realizadas análises visuais do comportamento temporal da radiação global. Para tanto, foram elaborados de gráficos de dispersão contendo a série temporal de cada município analisado.

Dados suspeitos que desviaram do comportamento esperado, demonstrando ser resultado de algum erro no curso da obtenção dos dados – e que resultaram em prejuízos às médias geradas – foram entendidos como lacunas e interpolados conforme a metodologia já explicada.

3.2 Obtenção das médias de irradiação global horizontal

Uma vez selecionadas e tratadas todas as séries temporais das estações, foram calculadas 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 sendo do que o quociente da soma de toda a radiação registrada no mês pelo número por seu número de dias. Uma vez calculados o dia médio de todos os meses ao longo das séries temporais de todas as estações de medição, estimou-se a média mensal do dia médio para todos os doze meses do ano, ou seja, a média diária mensal. Através dessa média, estimou-se a média diária sazonal e anual de radiação global horizontal de cada estação de medição.

3.3 Interpolação dos dados na elaboração dos mapas

A interpolação dos dados foi realizada no *software ArcGIS*, em seu componente *ArcMap*, adotando medidas padrão (*default*) do software 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, em vez de estimadas com base nos pontos vizinhos, premissa que responde ao comportamento esperado dos dados em questão.

4. RESULTADOS

4.1 Tratamento dos Dados

Para o preenchimento dos dados faltantes, haja vista que as séries temporais de todos os municípios eram consideravelmente longas (entre 3 e 13 anos), foi elaborada uma planilha eletrônica destinada à aplicação da metodologia de tratamento já descrita anteriormente.

A Figura 3 mostra a relação entre dados válidos e faltantes para as estações analisadas. Na estação automática situada na cidade de Bagé (31° 19' 51" S e 54° 06' 25" O), 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.

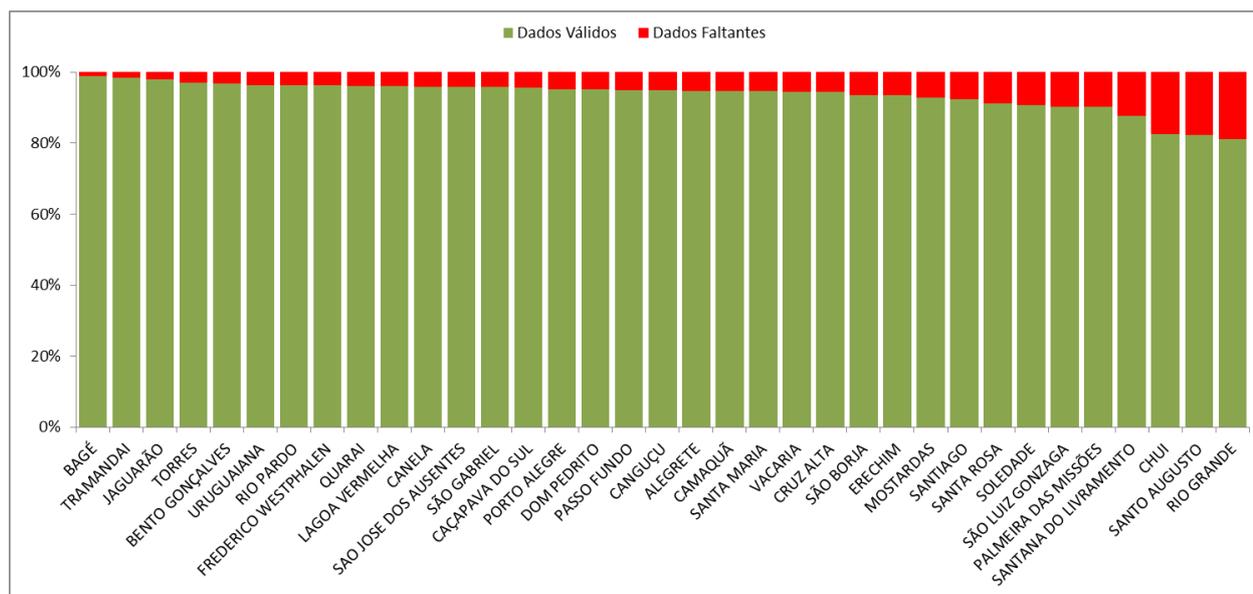


Figura 3 – Percentual de dados válidos e faltantes

4.2 Obtenção das médias de irradiação global horizontal

Inicialmente, para cada estação, foram obtidas as séries temporais e o valor diário médio mensal para a radiação solar global horizontal 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.

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 serem valores menores do que a média. Desse modo, por conta de serem esperados valores próximos a zero durante toda a curva de dispersão, em função de eventuais dias com baixa radiação solar (chuvosos ou nublados, por exemplo), os valores incoerentes não puderam ser discriminados dos demais. Somente através da elaboração dos dias médios de todos 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 todas as estações e, através delas, as médias sazonais e anuais de todos eles, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Médias sazonais e anual para a radiação solar global horizontal nas estações automáticas analisadas.

ESTAÇÃO	RADIÇÃO kWh/m ² /dia				ANUAL
	DEZ-FEV	MAR-MAI	JUN-JUL	AGO-NOV	
Alegrete	6,841	4,372	2,970	5,692	4,982
Bagé	6,912	4,316	2,891	5,544	4,927
Bento Gonçalves	6,208	3,996	2,876	5,118	4,544
Caçapava do Sul	6,654	4,172	2,867	5,333	4,767
Camaquã	5,924	3,704	2,502	4,730	4,214
Canela	5,862	3,866	2,837	5,012	4,388
Canguçu	6,158	3,887	2,642	4,944	4,360
Cruz Alta	6,569	4,322	3,116	5,262	4,814
Dom Pedrito	6,887	4,286	3,001	5,824	5,042
Erechim	6,383	4,254	3,205	5,303	4,780
Frederico Westphalen	6,373	4,205	3,068	5,283	4,728
Jaguarão	6,490	3,830	2,499	5,108	4,500
Lagoa Vermelha	6,334	4,145	3,046	5,189	4,676
Mostardas	6,893	4,194	2,888	5,491	4,868
Palmeira das Missões	6,208	4,326	3,149	5,097	4,748
Passo Fundo	6,382	3,969	2,993	5,122	4,678

Porto Alegre	6,004	3,668	2,489	4,754	4,228
Quaraí	6,805	4,279	2,957	5,620	4,925
Rio Grande	6,330	3,865	2,577	5,144	4,373
Rio Pardo	6,382	3,951	2,639	4,970	4,489
Santa Maria	6,290	3,917	2,644	4,964	4,461
Santa Rosa	6,509	4,285	3,025	5,487	4,823
Santana do Livramento	6,464	3,947	2,762	5,358	4,633
Santiago	6,681	4,280	3,101	5,516	4,965
Santo Augusto	6,252	4,145	2,954	5,051	4,606
São Borja	6,754	4,441	3,145	5,672	5,007
São Gabriel	6,781	4,202	2,782	5,450	4,811
São José dos Ausentes	5,836	4,073	3,158	5,142	4,544
São Luiz Gonzaga	6,752	4,542	3,216	5,642	5,039
Soledade	6,384	4,101	2,975	5,562	4,749
Torres	6,087	4,012	2,872	5,049	4,501
Tramandaí	6,462	4,053	2,732	5,171	4,606
Uruguaiana	6,884	4,406	3,030	5,555	5,006
Vacaria	5,964	3,840	3,035	5,016	4,396

4.3 Interpolação dos dados e elaboração dos mapas da radiação solar global horizontal

Através da elaboração dos mapas, com a estimativa de dados para toda a extensão territorial do estado através da interpolação por krigagem simples, também foi possível determinar a radiação solar global horizontal média, mínima e máxima – mensal, sazonal e anual para toda a área do estado do Rio Grande do Sul. Tais dados se encontram ilustrados na Tabela 2. Os valores apresentados na Tabela 2, quando comparados com os valores obtidos para as diferentes estações analisadas (Tabela 1), mostram que no estado do Rio Grande do Sul a variabilidade espacial da radiação solar na escala analisada é relativamente baixa (menor que 10%).

Tabela 2 – Valores mínimos, máximos e médias sazonais e mensais para radiação solar integrada em toda a superfície do estado do Rio Grande do Sul.

MAPAS	Radiação (kWh/m ² /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
	Maio	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

A Figura 4 apresenta os mapas solarimétricos gerados a partir dos dados qualificados e interpolados por meio da técnica de krigagem simples. Na Figura 4 temos as médias para as seguintes bases temporais: a) anual, b) verão (dez-fev), c) outono (mar-mai), d) inverno (jun-ago) e e) primavera (set-nov).

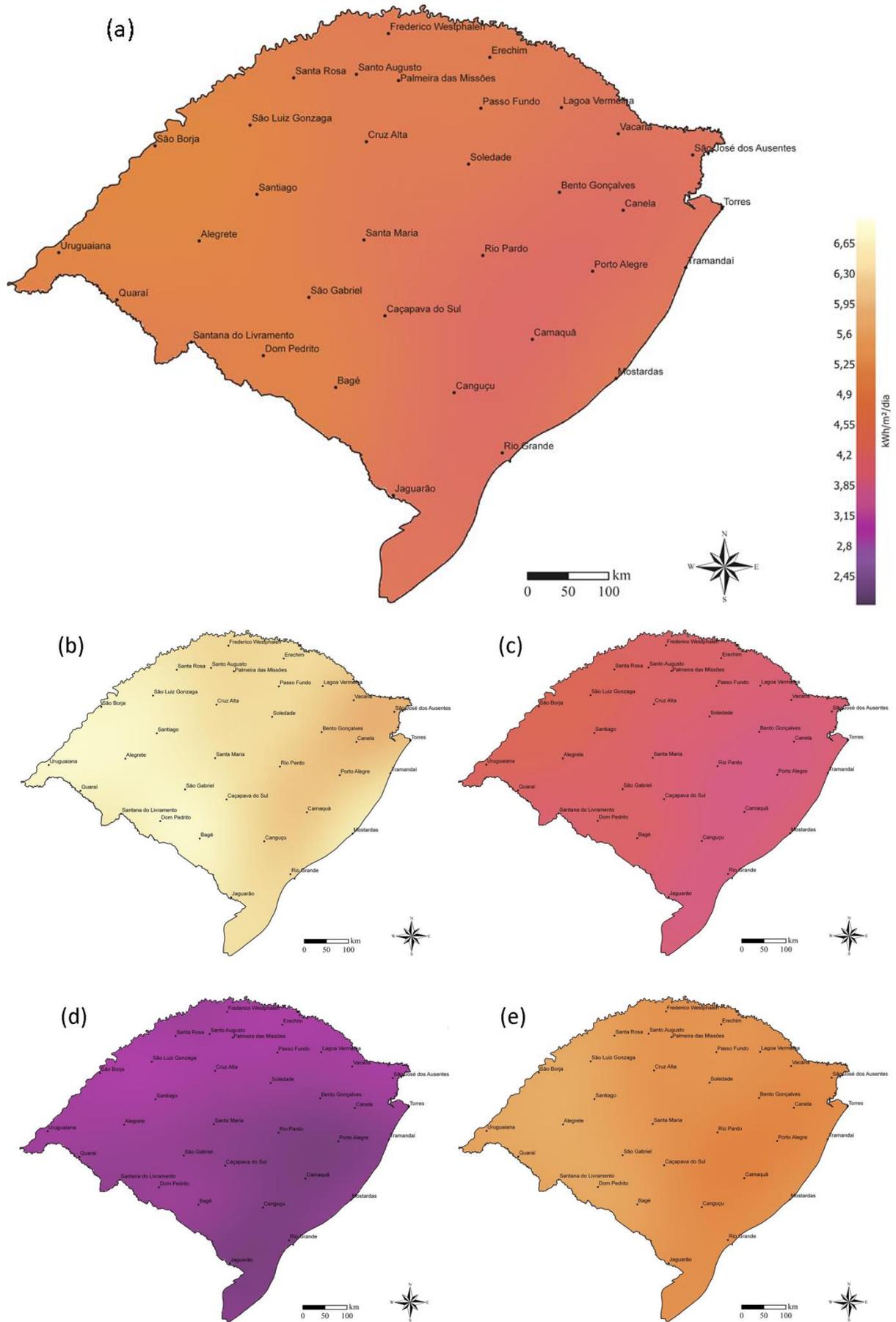


Figura 4 – Mapas solarimétricos gerados a partir dos dados qualificados e interpolados por meio da técnica de krigagem simples para as seguintes bases temporais: a) anual, b) verão (dez-fev), c) outono (mar-mai), d) inverno (jun-ago) e e) primavera (set-nov).

5. ANÁLISE DE ERROS E CONCLUSÕES

Através do recurso de validação cruzada (*cross-validation*) disponível no programa *ArcGIS*, foi elaborada a Tabela 3, que ilustra diferentes erros relacionados às estimativas dos mapas gerados. O Erro médio quadrático (RMSE) representa o desvio padrão dos erros obtidos como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

onde n é o número de pontos amostrados, P_i representa o valor previsto e O_i o valor obtido.

O MSE, ou desvio padrão das médias é descrito por:

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} / \sqrt{n} \quad (2)$$

O Erro médio quadrático normalizado é dado por:

$$SMSN = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \times \left(\frac{100}{\sigma}\right) \quad (3)$$

E por último, o Erro Padrão Médio foi calculado como:

$$\overline{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_1)^2} / \sqrt{n} \quad (4)$$

Tabela 3 – Erros associados obtidos pelo processo de validação cruzada nos mapas de radiação solar global horizontal.

MAPA	Erro médio quadrático (RMSE)	Desvio padrão das médias (MSE)	Erro médio quadrático normalizado (RMSN)	Erro Padrão Médio (MSE)
ANUAL	0,167	-0,036	0,989	0,165
Dez-Fev	0,214	-0,059	1,002	0,208
Mar-Mai	0,165	-0,023	1,054	0,1554
Jun-Ago	0,135	-0,002	0,976	0,141
Set-Nov	0,207	-0,04	0,976	0,213

Analisando a Tabela 3 é possível depreender que os mapas gerados através da krigagem simples respondem às expectativas de qualidade e apresentam erros dentro dos limites aceitáveis. Com a finalidade de que se fizesse possível visualizar a maneira com que os erros estão dispostos ao longo dos mapas, foram gerados mapas de erros padrões das estimativas (*standard prediction error*), conforme ilustrado na Figura 5.

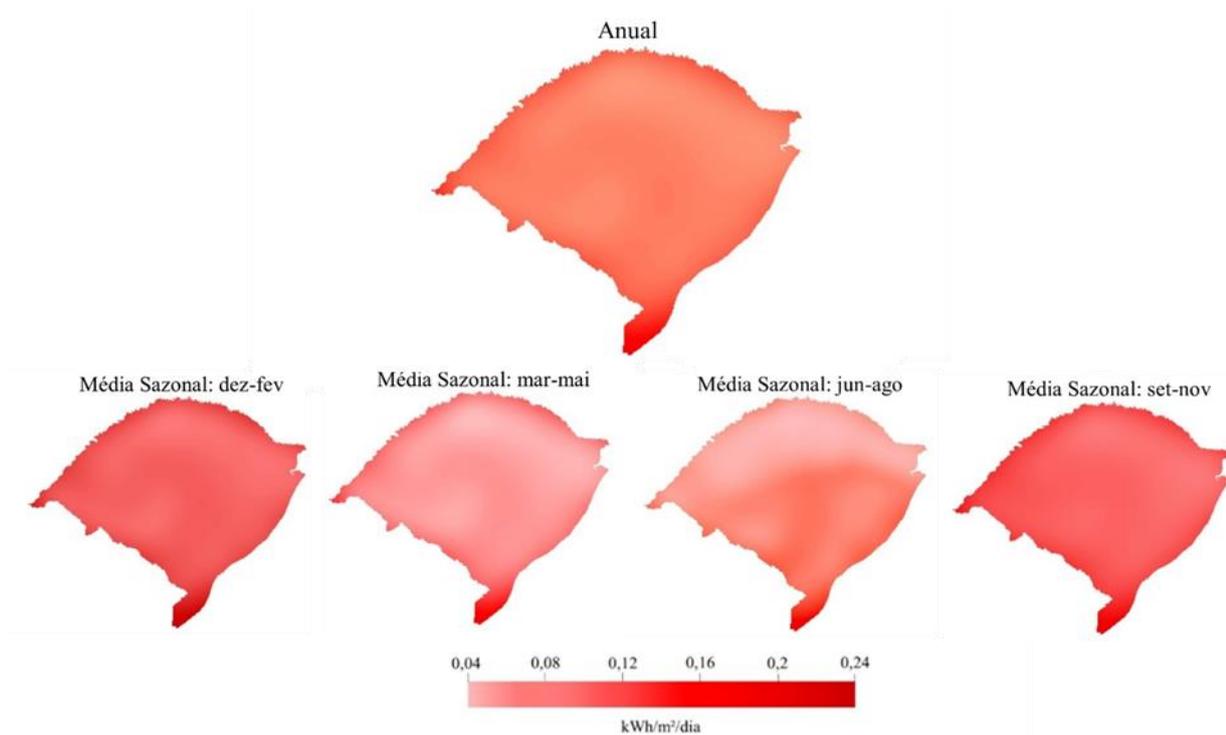


Figura 5 – Dispersão do erro padrão para os mapas gerados.

Observando a Figura 5, nota-se 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. Daí, dão-se as diferenças relacionadas aos valores do erro padrão médio dispostos na Tabela 3 e os erros dispostos nos mapas da Figura 5 (que são consideravelmente menores). Os erros ilustrados na Tabela 3 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. Portanto, os valores do erro padrão médio na Tabela 3 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.

Em posse desse entendimento, foi possível, através da elaboração destes mapas ilustrados na Figura 5, verificar o erro médio do erro padrão da estimativa para – tão somente – a área delimitada pelos limites do estado, que, para o mapa anual, foi de 0,08 kWh/m²/dia; para o mapa de verão, 0,1 kWh/m²/dia; para o mapa de outono, 0,07 kWh/m²/dia, para o mapa de inverno, 0,07 kWh/m²/dia e, finalmente, para o mapa de primavera, 0,1 kWh/m²/dia. Por meio desta constatação, é possível depreender que as médias do erro padrão representam, portanto, 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.

Finalmente, em posse do estudo dos erros associados às estimativas feitas por meio da krigagem simples no *software ArcGIS*, foi possível concluir que os mapas gerados ilustraram de maneira satisfatória o fenômeno de radiação global horizontal no estado do Rio Grande do Sul. Espera-se, por fim, que os mapas gerados no estudo possam tanto auxiliar no desenvolvimento da energia solar no estado, como no desenvolvimento de outros setores estratégicos dependentes de informações acerca da disponibilidade de radiação local.

Agradecimentos

À Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, pela concessão de bolsas de pesquisa para execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.
- Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.
- 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.
- Capeletto, G. J.; Zanchi, H. G.; CEEE; SME. Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2015: ano base 2014. Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em:

http://www.ceece.com.br/pportal/ceece/Archives/Upload/Balanco_Energetico_RS_2015_base_2014_61962.pdf. Acesso em 18 mai. 2017.

Eppley Lab. Disponível em: <<http://www.eppleylab.com/instrument-list/standard-precision-pyranometer/>>. Acesso em 30 out. 2017.

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.

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.

Wilcox, S. M.; Myers, D. R. Evaluation of Radiometers in FullTime Use at the National Renewable Energy Laboratory Solar Radiation Research Laboratory. Technical Report NREL/TP-550-44627. 2008.

DEVELOPING SOLAR RADIATION MAPS FOR THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL THROUGH THE TREATMENT AND INTERPOLATION OF DATA FROM METEOROLOGICAL STATIONS

Abstract. *Because it responds directly to sustainable development's requirements, scientific production which seeks to foster investments in solar energy conversion technology is indispensable. In respect to this, this paper aims to create solar maps illustrating the daily annual and seasonal global radiations average in the state of Rio Grande do Sul (BR) by means of data collected within 34 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 and seasonal global radiations average for each station. 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/m²/day; the maximum, 5,01 kWh/m²/day; and the average, 4,67 kWh/m²/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.*

Key words: *Solar Radiation, Solar Map, Kriging.*