

## REGIONAL WIND VARIABILITY IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

S. D. SANTOS<sup>1</sup>, I. S. LEONARDI<sup>2</sup>, M. D. CASSENOTE<sup>3</sup>, A. M. SILVA<sup>4</sup>, E. J. SEIDEL<sup>5</sup>

Universidade Federal de Santa Maria

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9656-0699>\*[enioseidel@gmail.com](mailto:enioseidel@gmail.com)\*

Submetido 31/08/2023 - Aceito 23/09/2025

DOI: 10.15628/holos.2025.15955

## ABSTRACT

Understanding the spatial and temporal dynamics of the wind is fundamental for human activities. The objective of this work is to carry out a regional and temporal comparison of the direction (degrees), speed ( $\text{m.s}^{-1}$ ) and gusts ( $\text{m.s}^{-1}$ ) of the wind in the territory of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Data from 44 automatic meteorological stations in the years 2020 and 2021 were considered. The different mesoregions of the state of Rio Grande do Sul (RS) and the different seasons of the year (spring, summer, autumn and winter) were compared using circular and non-parametric statistical methods.

Finally, spatial interpolation maps of wind direction, speed and gusts were generated. It is noticed that there is a predominance of winds in the east and east-southeast directions, being concentrated winds and with little directional variability. In addition, the winds have both higher average speeds and higher average gusts in the southern region and on the coast of the state of Rio Grande do Sul. The lowest speeds and smallest gusts are observed in the North/Northwest of the state of Rio Grande do Sul.

**KEYWORDS:** Wind direction, Wind speed, Regional climatology, Circular statistics, Spatial interpolation.

## VARIABILIDADE REGIONAL DO VENTO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

## RESUMO

Compreender a dinâmica espacial e temporal do vento é fundamental para as atividades humanas. O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação regional e temporal da direção (graus), velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e rajadas ( $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento no território do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Foram considerados dados de 44 estações meteorológicas automáticas nos anos de 2020 e 2021. Comparações entre as diferentes mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul (RS) e as distintas estações do ano (primavera, verão, outono e inverno) foram realizadas por meio de métodos de estatística circular e

estatística não-paramétrica. Por fim, foram gerados mapas de interpolação espacial da direção, velocidade e rajadas do vento. Percebe-se que há um predomínio de ventos nas direções leste e leste-sudeste, sendo ventos concentrados e com pouca variabilidade direcional. Além disso, os ventos apresentam maiores velocidades médias e maiores rajadas médias na região Sul e no litoral do estado do Rio Grande do Sul. Já as menores velocidades e menores rajadas são observadas no Norte/Noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

**Palavras chave:** Direção do vento, Velocidade do vento, Climatologia regional, Estatística circular, Interpolação espacial.

## 1 INTRODUÇÃO

Uma região geográfica depende da dinâmica climática exercida pela pluviometria, temperatura, radiação, ventos, dentre outros. Em relação ao vento, são de interesse o comportamento em termos de direção e velocidade. Essas características do vento são investigadas em termos de direção predominante, velocidade média, variações de comportamento temporal e espacial, dentre outros. De acordo com Pontes et al. (2018), a intensidade e a direção dos ventos são determinadas pela variação espacial e temporal do balanço de energia na superfície terrestre, causando variações no campo de pressão atmosférica.

O vento é um dos principais elementos na caracterização do clima regional por ser fortemente associado a prejuízos socioeconômicos e materiais do espaço geográfico (Wollmann & Galvani, 2012). Além disso, o vento é fundamental para o monitoramento e previsão de padrões de tempo e do clima global (Ponciano & Back, 2022).

No campo da pesquisa, como exemplo, as ciências agroambientais utilizam a energia renovável do vento na produção de energia eólica (Munhoz & Garcia, 2008; Alves & Silva, 2011). Na agricultura, a velocidade e direção do vento são consideradas no momento de aplicação de defensivos agrícolas, na polinização, na propagação de doenças e nas práticas de quebra-vento (Munhoz & Garcia, 2008; Alves & Silva, 2011). Ainda, na construção civil, a ventilação é uma aliada ao conforto térmico em construções em regiões de climas quentes e úmidos e a velocidade do vento é impactada por diferentes arranjos construtivos (Lima & Bittencourt, 2017). O estudo das cargas de vento também é indispensável na segurança estrutural das construções (Almeida et al. 2021).

A literatura apresenta vários estudos sobre a dinâmica dos ventos em várias regiões do Brasil, com pesquisas em áreas do Norte (Pontes et al., 2018), Nordeste (Borges et al., 2018; Araújo Junior et al., 2019; Silva & Barbosa, 2022), Centro-Oeste (Silva & Vieira, 2016), Sudeste (Sobral et al., 2018; Ramos et al., 2021) e Sul (Castelhano & Rosiguini, 2018; Wahrlich et al., 2018; Terassi et al., 2019; Ponciano & Back, 2022). No que tange especificamente estudos sobre o comportamento do vento no estado do Rio Grande do Sul (RS) é possível destacar as pesquisas de Favera et al. (2012), que estudou o comportamento dos ventos na região central do estado do Rio Grande do Sul, de Rockett et al. (2017), que avaliou a dinâmica espaço-temporal dos ventos no extremo norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, e de Barbara Neto et al. (2021), que avaliaram velocidade e direção do vento na bacia hidrográfica do litoral do estado do Rio Grande do Sul.

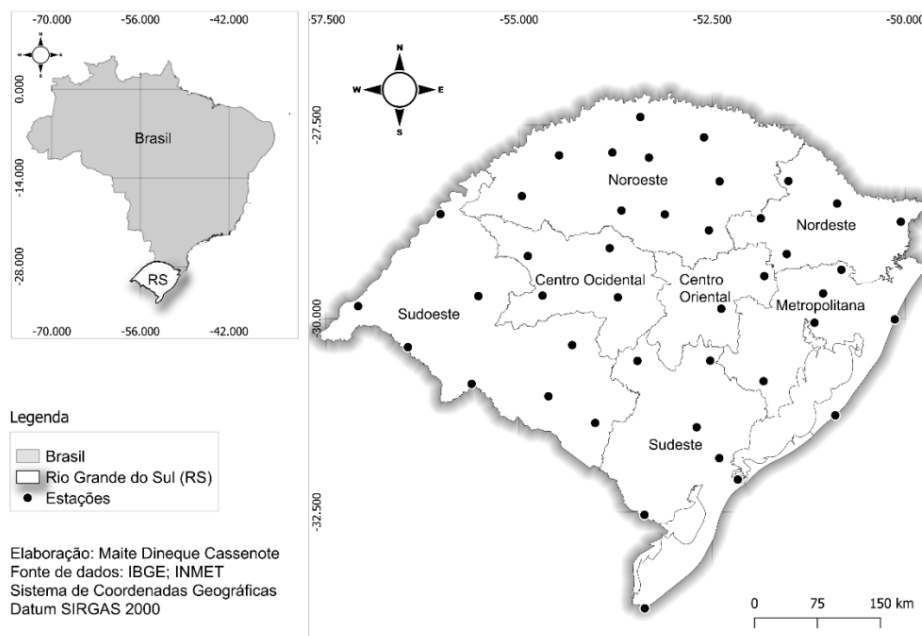
O regime local de ventos é descrito com base em séries históricas de dados de velocidade horizontal e direção (Borges et al., 2018). A velocidade do vento é uma grandeza vetorial definida pela sua intensidade, pela direção e pelo sentido, sendo que a direção e o sentido podem ser expressos em ângulo ou pela posição em relação aos pontos cardeais segundo a rosa dos ventos (Back, 2020). A velocidade e as rajadas, medidas em metros por segundo ( $m.s^{-1}$ ), são variáveis quantitativas contínuas que podem ser estudadas sob o prisma da inferência estatística. Já a direção do vento, medida em graus, é uma variável circular que exige uma abordagem específica por meio da estatística circular. Na estatística circular (Fisher, 1993; Pewsey et al., 2013) uma

observação circular pode ser averiguada em um círculo de raio unitário ou vetor unitário no plano e se a direção está definida, então cada observação circular é dada de forma angular.

Poucos são os estudos que descreveram o comportamento dos ventos no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Além disso, não se tem uma abordagem de avaliação das características do vento considerando as mesorregiões do estado do RS e os efeitos das estações do ano. Desse modo, o objetivo do trabalho é realizar uma comparação regional e temporal da direção (graus), velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e rajadas ( $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento no território do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de direção (em graus), velocidade e rajadas (em  $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento foram coletados no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [<https://portal.inmet.gov.br/>], por meio de informações de 44 estações meteorológicas automáticas no estado do Rio Grande do Sul (RS) (Figura 1). Foram considerados para análise os anos de 2020 e 2021. Os dados horários foram organizados em cada estação meteorológica para cada um dos meses do ano. Por fim, a média dos dados horários gerou o valor representativo do mês para direção (graus), velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e rajadas ( $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento.



Fonte: Elaboração própria. \*Imagem elaborada no programa QGIS, utilizando dados do IBGE e do INMET.

**Figura 1: Localização das 44 estações meteorológicas automáticas nas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.**

Foram utilizadas 16 direções do vento, igualmente espaçadas a cada 22,5 graus, conforme a convenção meteorológica da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2008). As direções e seus intervalos correspondentes foram: norte N (348,75 – 11,25), norte-nordeste NNE (11,25 – 33,75), nordeste NE (33,75 – 56,25), leste-nordeste ENE (56,25 – 78,75), leste E (78,75 – 101,25), leste-sudeste ESE (101,25 – 123,75), sudeste SE (123,75 – 146,25), sul-sudeste SSE (146,25 –

168,75), sul S (168,75 – 191,25), sul-sudoeste SSW (191,25 – 213,75), sudoeste SW (213,75 – 236,25), oeste-sudoeste WSW (236,25 – 258,75), oeste W (258,75 – 281,25), oeste-noroeste WNW (281,25 – 303,75), noroeste NW (303,75 – 326,25) e norte-noroeste NNW (326,25 – 348,75).

Para avaliar o efeito das mesorregiões nas características do vento foram consideradas as estações meteorológicas de abrangência das mesorregiões do RS (Figura 1). As mesorregiões consideradas foram: Centro Rio-Grandense, Metropolitana de Porto Alegre, Nordeste Rio-Grandense, Noroeste Rio-Grandense, Sudeste Rio-Grandense e Sudoeste Rio-Grandense. A região Centro Rio-Grandense foi considerada como a união das mesorregiões Centro Ocidental Rio-Grandense e Centro Oriental Rio-Grandense.

Quanto à avaliação do efeito sazonal (temporal) das características do vento no RS, os meses do ano foram agrupados em estações do ano da seguinte forma: verão (meses de janeiro, fevereiro e março), outono (meses de abril, maio e junho), inverno (meses de julho, agosto e setembro) e primavera (meses de outubro, novembro e dezembro).

Primeiramente, foi realizada uma análise descritiva das características do vento. A descrição da direção do vento (graus) foi realizada por meio de média circular, mediana circular, desvio padrão circular, coeficiente de concentração circular e aplicação do teste de uniformidade. Já para caracterizar a velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento e as rajadas ( $\text{m.s}^{-1}$ ), foram calculadas média, mediana, desvio padrão, coeficiente de assimetria e aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

Para comparar o comportamento das características do vento nas distintas mesorregiões e nas estações do ano, foram aplicados testes de hipótese. Para todos os testes foi considerado 5% de probabilidade.

Na comparação do comportamento da direção (graus) do vento entre as seis mesorregiões e entre as quatro estações do ano foi aplicado o teste de Watson-Wheeler. Para as comparações post-hoc foi aplicado o teste de Watson-Wheeler 2 a 2, com correção de Bonferroni.

Já para a comparação da velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e da rajada ( $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento entre as seis mesorregiões e entre as quatro estações do ano foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis. Para as comparações post-hoc foi aplicado o teste de Dunn, com correção de Bonferroni.

Para interpolação espacial da direção do vento (em formato de pontos cardeais) foi utilizado o método dos k vizinhos mais próximos (kNN). Para interpolação espacial da velocidade (em  $\text{m.s}^{-1}$ ) e das rajadas (em  $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento foi utilizado o método do inverso do quadrado das distâncias (IQD).

As análises estatísticas foram realizadas no programa R (R CORE TEAM, 2021). Foi utilizado o pacote circular (AGOSTINELLI; LUND, 2022) para fazer a análise descritiva dos dados de direção e para aplicar o teste de Watson-Wheeler. Os pacotes base, moments (KOMSTA; NOVOMESTKY, 2015) e stats foram utilizados para a análise descritiva dos dados e para o teste de Shapiro-Wilk. O pacote agricolae (MENDIBURU, 2021) foi usado para realizar o teste de Kruskal-Wallis. O pacote dunn.test (DINNO, 2017) foi utilizado para realizar o teste de Dunn. O pacote kkn (SCHLIEP; HECHENBICHLER, 2016) foi usado para fazer a interpolação por meio do método kNN. O pacote gstat (PEBESMA, 2004) foi usado para realizar a interpolação por IQD.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o comportamento das características do vento em função das mesorregiões, em 2020 e 2021, respectivamente. Observa-se que, em 2020, todas as mesorregiões apresentam ventos médios entre as direções leste-nordeste (ENE), leste (E) e leste-sudeste (ESE) (56,25 até 123,75 graus), com exceção da mesorregião Nordeste Rio-Grandense que tem direção média nordeste (NE) (51,08 graus). Já em 2021, todas as mesorregiões apresentam ventos médios entre as direções leste (E) e leste-sudeste (ESE) (67,50 até 123,75 graus), com exceção da mesorregião Nordeste Rio-Grandense que tem direção média nordeste (NE) (56,19 graus).

Santos et al. (2019), ao estudarem o comportamento direcional do vento para os anos de 2017 e 2018, identificaram ventos predominantes nas direções leste (E), leste-sudeste (ESE) e leste-nordeste (ENE) no estado do Rio Grande do Sul. Deste modo, percebe-se que, ao longo dos anos, há tendência de predomínio de ventos de direção leste-nordeste (ENE) a leste-sudeste (ESE) no RS.

Rockett et al. (2017), observaram ventos predominantes nas direções nordeste (NE) e sudoeste (SW) no extremo norte do litoral do Rio Grande do Sul. Já, neste estudo, a mesorregião Metropolitana de Porto Alegre, da qual faz parte a região norte da planície costeira do estado do RS, apresenta ventos predominantes na direção leste-nordeste (ENE).

Favera et al. (2012), ao avaliarem ventos na região central do estado do RS, verificaram ventos mais predominantes na direção sudeste (SE). Este resultado é semelhante ao observado neste estudo que evidenciou ventos médios na direção leste-sudeste (ESE) na mesorregião Centro Rio-Grandense. Barbara Neto et al. (2021), observaram na região mais ao sul e ao litoral do estado do RS um predomínio de ventos na direção nordeste (NE). Este resultado é próximo ao observado neste estudo com ventos de leste (E) a leste-nordeste (ENE) nas mesorregiões Sudeste Rio-Grandense e Metropolitana de Porto Alegre, respectivamente.

Além disso, em 2020, todas as mesorregiões não apresentaram ventos uniformemente distribuídos de acordo com o teste de uniformidade, com destaque para as mesorregiões Centro Rio-Grandense, Noroeste Rio-Grandense e Sudoeste Rio-Grandense que, com coeficientes de concentração maiores que 0,70, possuem ventos bem concentrados em uma direção preferencial, que, em média, é definida como na direção leste (E) (Tabela 1). Em 2021, todas as mesorregiões não apresentaram ventos uniformemente distribuídos com base no teste de uniformidade, com destaque para as mesorregiões Centro Rio-Grandense e Sudoeste Rio-Grandense que, com coeficientes de concentração maiores que 0,70, possuem ventos bem concentrados em uma direção preferencial (direção média leste (E) e direção média sudeste (SE), respectivamente) (Tabela 1).

**Tabela 1: Medidas descritivas\* para direção (em graus), velocidade ( $m.s^{-1}$ ) e rajadas ( $m.s^{-1}$ ) do vento para as mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul, em 2020 e 2021.**

Mesorregião	Média	Direção	Desvio Padrão	Coeficiente e Concentração	Teste de Uniformidade
Direção do vento (graus)					
2020					
Centro	102,89	ESE	0,78	0,74	Não

Metropolitana	75,00	ENE	1,19	0,49	Não
Nordeste	51,08	NE	1,12	0,53	Não
Noroeste	90,94	E	0,66	0,80	Não
Sudeste	87,21	E	1,11	0,54	Não
Sudoeste	108,45	ESE	0,58	0,84	Não
2021					
Centro	107,41	ESE	0,54	0,86	Não
Metropolitana	85,36	E	1,28	0,44	Não
Nordeste	56,19	NE	0,98	0,62	Não
Noroeste	108,37	ESE	1,11	0,54	Não
Sudeste	97,22	E	1,19	0,49	Não
Sudoeste	116,82	ESE	0,38	0,93	Não
Mesorregião	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Assimetria	Teste de Normalidade
Velocidade do vento (m.s <sup>-1</sup> )					
2020					
Centro	2,33	2,22	0,46	0,59	Não
Metropolitana	2,40	1,71	1,55	1,50	Não
Nordeste	2,91	2,94	1,11	0,68	Não
Noroeste	2,37	2,30	1,04	0,05	Sim
Sudeste	3,51	3,20	0,96	0,97	Não
Sudoeste	2,64	2,67	0,94	-0,74	Não
2021					
Centro	2,33	2,20	0,61	1,16	Não
Metropolitana	1,83	1,44	0,78	0,56	Não
Nordeste	2,65	2,88	0,72	-1,29	Não
Noroeste	2,12	2,14	1,27	-0,03	Não
Sudeste	3,20	3,27	1,24	-0,45	Não
Sudoeste	2,08	2,03	1,06	0,15	Não
Mesorregião	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Assimetria	Teste de Normalidade
Rajadas do vento (m.s <sup>-1</sup> )					
2020					
Centro	5,47	5,50	0,72	-0,11	Sim
Metropolitana	5,74	5,37	2,18	1,57	Não
Nordeste	6,22	6,53	1,43	-0,32	Não
Noroeste	5,65	5,61	1,18	-0,01	Sim
Sudeste	7,03	7,04	1,11	0,53	Sim
Sudoeste	5,89	6,04	1,05	-0,91	Não
2021					
Centro	5,42	5,32	0,89	0,43	Sim
Metropolitana	4,86	4,72	1,11	0,32	Sim
Nordeste	5,88	6,21	1,21	-1,30	Não
Noroeste	5,15	5,28	1,68	-0,29	Não
Sudeste	6,68	6,87	1,64	-0,64	Não
Sudoeste	5,30	5,39	1,28	-0,17	Sim

\*Medidas descritivas circulares para direção do vento: Média Circular, Mediana Circular, Desvio Padrão Circular e Coeficiente de Concentração Circular.

Fonte: Elaboração própria.

Para os dois anos de análise, 2020 e 2021, a mesorregião Sudeste Rio-Grandense apresenta maior velocidade média do vento com  $3,51 \text{ m.s}^{-1}$  e  $3,20 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente. Em termos de variabilidade, a mesorregião Centro Rio-Grandense apresenta menor dispersão (Desvio padrão de  $0,46 \text{ m.s}^{-1}$  em 2020 e de  $0,61 \text{ m.s}^{-1}$  em 2021) nas velocidades do vento, indicando mais homogeneidade (Tabela 1).

Ainda, na Tabela 1 verifica-se que em ambos os anos (2020 e 2021) a mesorregião que apresenta maiores médias de rajadas é a Sudeste Rio-Grandense, com valores iguais a  $7,03 \text{ m.s}^{-1}$  e  $6,68 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente.

Barbara Neto et al. (2021), em seu estudo, observaram na região mais ao sul e ao litoral do estado do Rio Grande do Sul velocidades do vento de até  $6,1 \text{ m.s}^{-1}$ , o que corrobora os resultados deste trabalho em relação às rajadas do vento.

Quando é levado em consideração o desvio padrão em 2020 e em 2021 a mesorregião Centro é a que possui os menores valores, sendo  $0,72 \text{ m.s}^{-1}$  e  $0,89 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente, assim indicando uma homogeneidade de rajadas dessa mesorregião.

A Tabela 2 apresenta o comportamento das características do vento em função das estações do ano, em 2020 e 2021, respectivamente. Em 2020, os ventos apresentam direção média leste (E) nas estações do verão e do inverno, e direção média nordeste (NE) no outono e direção média leste-sudeste (ESE) na primavera. Já em 2021, o vento tem direção média preferencial leste-sudeste (ESE) na primavera e no verão, e direção preferencial leste (E) nas estações do outono e do inverno.

Além disso, tanto em 2020 quanto em 2021, os ventos são mais concentrados nas estações da primavera e do verão, com coeficientes de concentração maiores ou iguais a 0,70 (Tabela 2). Santos et al. (2019) observaram ventos mais concentrados nos meses correspondentes às estações da primavera e do verão em todas as mesorregiões, com exceção da mesorregião Nordeste Rio-Grandense que apresentou em todos os meses valores de coeficiente de concentração menores que 0,70.

Silva et al. (1997), em Pelotas, Rio Grande do Sul, observaram ventos na direção leste (E) na primavera e no verão, na direção sudeste (SE) no outono, e na direção nordeste (NE) na estação do inverno.

**Tabela 2: Medidas descritivas\* para direção (em graus), velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e rajadas ( $\text{m.s}^{-1}$ ) do vento para as estações do ano no estado do Rio Grande do Sul, em 2020 e 2021.**

Estação	Média	Direção	Desvio Padrão	Coeficiente de Concentração	Teste de Uniformidade
Direção do vento (graus)					
2020					
Verão	93,32	E	0,45	0,90	Não
Outono	46,10	NE	1,44	0,35	Não
Inverno	85,11	E	0,87	0,68	Não



Primavera	112,75	ESE	0,60	0,83	Não
2021					
Verão	108,02	ESE	0,84	0,70	Não
Outono	97,48	E	1,35	0,40	Não
Inverno	79,44	E	1,01	0,60	Não
Primavera	110,97	ESE	0,59	0,84	Não
Estação	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coeficiente de Assimetria	Teste de Normalidade
Velocidade do vento (m.s <sup>-1</sup> )					
2020					
Verão	2,78	2,63	1,27	0,97	Sim
Outono	2,66	2,63	1,18	0,62	Não
Inverno	2,55	2,62	0,89	0,02	Não
Primavera	2,67	2,85	1,10	0,16	Não
2021					
Verão	2,16	2,23	1,07	0,39	Sim
Outono	2,17	2,28	1,12	0,23	Sim
Inverno	2,42	2,53	1,12	-0,13	Sim
Primavera	2,66	2,76	1,08	-0,33	Não
Estação	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coeficiente de Assimetria	Teste de Normalidade
Rajadas do vento (m.s <sup>-1</sup> )					
2020					
Verão	6,12	5,99	1,58	1,23	Sim
Outono	5,88	5,92	1,55	0,85	Não
Inverno	5,66	5,88	1,10	-0,36	Sim
Primavera	6,26	6,39	1,26	-0,28	Não
2021					
Verão	5,26	5,32	1,36	0,01	Sim
Outono	5,07	5,16	1,50	0,11	Sim
Inverno	5,57	5,68	1,52	-0,20	Não
Primavera	6,24	6,41	1,32	-0,62	Sim

\*Medidas descritivas circulares para direção do vento: Média Circular, Mediana Circular, Desvio Padrão Circular e Coeficiente de Concentração Circular.

Fonte: Elaboração própria.

Em relação a velocidade dos ventos, a Tabela 2 indica que, em 2020, todas as estações do ano apresentam velocidades médias do vento semelhantes. Já em 2021, na primavera e no inverno as velocidades médias do vento são um pouco mais elevadas, com 2,66 m.s<sup>-1</sup> e 2,42 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente.

Silva et al. (1997), em Pelotas, RS, observaram que na primavera são encontradas as maiores velocidades dos ventos, e no outono ocorrem ventos de menor velocidade. Wollmann e Galvani (2012), observam a atuação da brisa marinha durante o período diurno no litoral do RS, com destaque na primavera e verão. Além disso, os autores destacam que nas Serras do Planalto da Bacia do Paraná os ventos tendem a ser mais fracos durante os meses de verão e no início da



noite. Já no estudo de Rockett et al. (2017) foram identificadas maiores velocidades médias no inverno.

Por fim, a Tabela 2 indica que, tanto em 2020 quanto em 2021, ocorrem maiores rajadas (tanto em média quanto em termos de mediana) na primavera.

Na tabela 3 é apresentada a comparação das mesorregiões em relação à direção, velocidade e rajadas do vento, em 2020 e em 2021. Em relação à direção do vento, é possível destacar que, tanto em 2020 quanto em 2021, a mesorregião Nordeste Rio-Grandense difere das demais mesorregiões, com exceção da mesorregião Metropolitana de Porto Alegre. Além disso, nos dois anos, a mesorregião Sudoeste Rio-Grandense difere das demais mesorregiões, com exceção da mesorregião Centro Rio-Grandense.

No que se refere à velocidade do vento, as comparações são realizadas com base em inferência não-paramétrica, pois as velocidades para as distintas mesorregiões, em alguns casos, não apresentaram normalidade com base no teste de Shapiro-Wilk. Em 2020, a mesorregião Nordeste Rio-Grandense difere das demais mesorregiões, com exceção das mesorregiões Sudeste Rio-Grandense e Sudoeste Rio-Grandense. A mesorregião Sudeste Rio-Grandense difere de todas as mesorregiões, com exceção da mesorregião Nordeste Rio-Grandense.

Em 2021, a mesorregião Nordeste Rio-Grandense difere das demais mesorregiões, com exceção das mesorregiões Centro Rio-Grandense e Sudeste Rio-Grandense. A mesorregião Sudeste Rio-Grandense difere das demais mesorregiões, com exceção da mesorregião Nordeste Rio-Grandense.

Ainda na tabela 3 são apresentadas as comparações entre as mesorregiões, em ambos os anos, para as rajadas do vento. As comparações são realizadas com base em inferência não-paramétrica, pois as rajadas para as distintas mesorregiões, em alguns casos, não apresentaram normalidade com base no teste de Shapiro-Wilk. Nota-se que a única mudança entre os dois anos é que em 2020 as mesorregiões Centro Rio-Grandense e Nordeste Rio-Grandense eram diferentes e passaram a ser iguais em 2021.

Em ambos os anos a mesorregião Metropolitana de Porto Alegre se diferenciou da Nordeste Rio-Grandense e Sudeste Rio-Grandense. Em 2020 a mesorregião Nordeste Rio-Grandense se diferenciou da Centro Rio-Grandense, Metropolitana de Porto Alegre e da Noroeste Rio-Grandense, já em 2021 passa a não se diferenciar da Centro Rio-Grandense. Nos dois anos a mesorregião Noroeste Rio-Grandense se diferenciou da Nordeste Rio-Grandense e Sudeste Rio-Grandense. A mesorregião Sudeste Rio-Grandense se difere de todas com exceção da Noroeste Rio-Grandense tanto em 2020 como em 2021. Já a Sudoeste não se difere das demais com exceção da Sudeste Rio-Grandense.

**Tabela 3: Comparações\* entre mesorregiões por meio do teste de Watson-Wheeler 2 a 2, com correção de Bonferroni (para Direção do vento) e do teste de Dunn (para Velocidade e Rajadas do vento).**

Comparações para direção do vento					
2020					
	Metropolitana	Nordeste	Noroeste	Sudeste	Sudoeste
Centro	=	≠	=	=	=

Metropolitana	=	≠	=	≠
Nordeste		≠	≠	≠
Noroeste			=	≠
Sudeste				≠
2021				
	Metropolitana	Nordeste	Noroeste	Sudeste Sudoeste
Centro	≠	≠	=	= =
Metropolitana		=	=	= ≠
Nordeste			≠	≠ ≠
Noroeste				= ≠
Sudeste				≠
Comparações para velocidade do vento				
2020				
	Metropolitana	Nordeste	Noroeste	Sudeste Sudoeste
Centro	=	≠	=	≠ =
Metropolitana		≠	=	≠ =
Nordeste			≠	= =
Noroeste				≠ =
Sudeste				≠
2021				
	Metropolitana	Nordeste	Noroeste	Sudeste Sudoeste
Centro	=	=	=	≠ =
Metropolitana		≠	=	≠ =
Nordeste			≠	= ≠
Noroeste				≠ =
Sudeste				≠
Comparações para rajadas de vento				
2020				
	Metropolitana	Nordeste	Noroeste	Sudeste Sudoeste
Centro	=	≠	=	≠ =
Metropolitana		≠	=	≠ =
Nordeste			≠	= =
Noroeste				≠ =
Sudeste				≠
2021				
	Metropolitana	Nordeste	Noroeste	Sudeste Sudoeste
Centro	=	=	=	≠ =
Metropolitana		≠	=	≠ =
Nordeste			≠	= =
Noroeste				≠ =
Sudeste				≠

\*=igual. ≠diferente.

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4 são apresentadas as comparações das estações do ano em relação à direção, velocidade e rajadas do vento, tanto em 2020 quanto em 2021.

Em termos de direção do vento, em 2020, todas as estações diferem entre si. Já em 2021, a primavera difere das demais estações do Ano.

As comparações entre as estações do ano, em relação à velocidade do vento, são realizadas com base em inferência não-paramétrica, pois as velocidades para as distintas estações do ano, em alguns casos, não apresentaram normalidade com base no teste de Shapiro-Wilk. Em 2020, não há diferenças entre as estações do Ano. Contudo, em 2021, a primavera difere do verão e do outono.

Em relação às rajadas do vento, as comparações são realizadas com base em inferência não-paramétrica, pois as rajadas para as distintas estações do ano, em alguns casos, não apresentaram normalidade com base no teste de Shapiro-Wilk. Em 2020, a primavera se difere tanto do outono quanto do inverno. Já em 2021 primavera se diferencia de todas as demais estações.

**Tabela 4: Comparações\* entre estações do ano por meio do teste de Watson-Wheeler 2 a 2, com correção de Bonferroni (para Direção do vento) e do teste de Dunn (para Velocidade e Rajadas do vento).**

Comparações para direção do vento			
2020			
	Autumn	Winter	Spring
Summer	≠	≠	≠
Autumn		≠	≠
Winter			≠
2021			
	Autumn	Winter	Spring
Summer	=	=	≠
Autumn		=	≠
Winter			≠
Comparações para velocidade do vento			
2020			
	Autumn	Winter	Spring
Summer	=	=	=
Autumn		=	=
Winter			=
2021			
	Autumn	Winter	Spring
Summer	=	=	≠
Autumn		=	≠
Winter			=
Comparações para rajadas do vento			
2020			
	Autumn	Winter	Spring
Summer	=	=	=
Autumn		=	≠

Winter	≠		
2021			
	Autumn	Winter	Spring
Summer	=	=	≠
Autumn		=	≠
Winter			≠

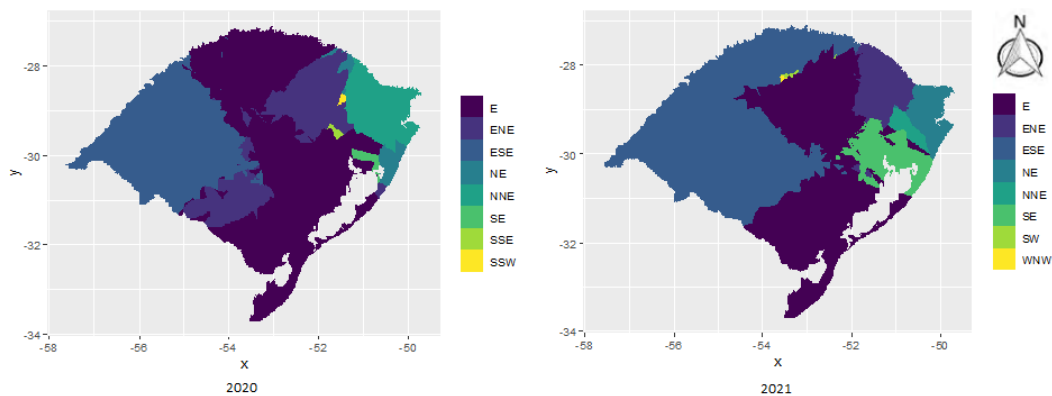
\*=igual. ≠diferente.

Fonte: Elaboração própria.

A aplicação dos métodos de estatística circular e de estatística não-paramétrica permitiram realizar uma caracterização relevante da dinâmica dos ventos no território do Rio Grande do Sul. A abordagem por estatística não-paramétrica já é bem consolidada na literatura. Contudo, a abordagem por meio da estatística circular ainda é incipiente, necessitando de mais pesquisas e divulgação para melhor tratamento de dados circulares e direcionais.

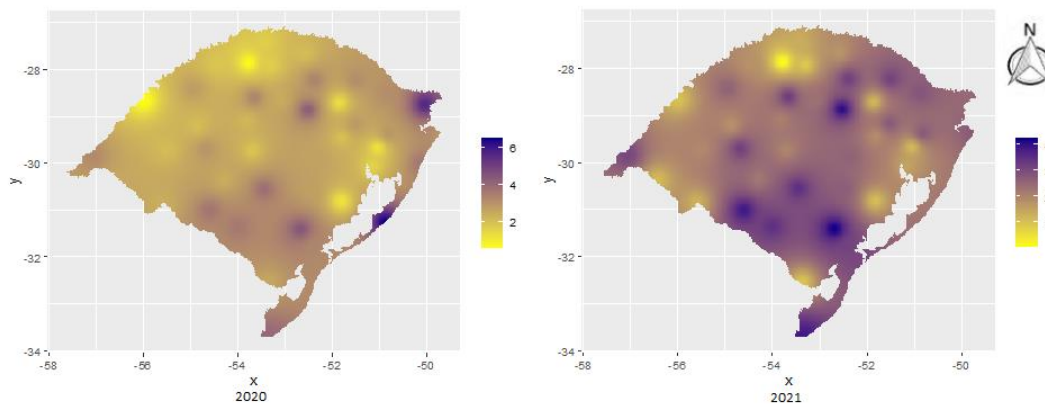
Grande parte dos estudos envolvendo direção de vento não aplicam métodos de descrição e inferência circulares. Esse tipo de dado apresenta uma periodicidade distribucional que não é semelhante aos dados lineares e por isso o uso de metodologias estatísticas adequadas é de suma importância.

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente as predições espaciais para Direção do vento (em formato de pontos cardeais), para Velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) e para Rajadas do vento ( $m.s^{-1}$ ).



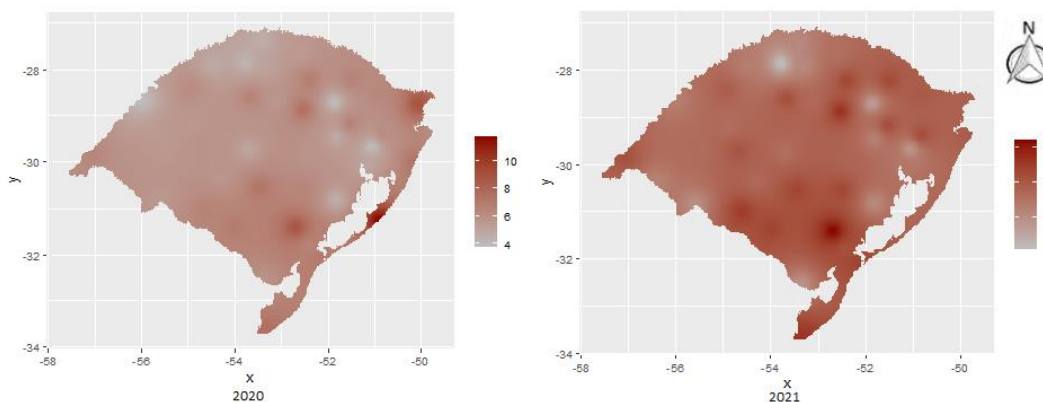
Fonte: Elaboração própria. \*Imagem elaborada no programa R.

**Figura 2: Predição espacial da Direção do vento (em formato de pontos cardeais) no estado do Rio Grande do Sul nos anos de 2020 e 2021.**



Fonte: Elaboração própria. \*Imagem elaborada no programa R.

**Figura 3: Predição espacial da Velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) no estado do Rio Grande do Sul nos anos de 2020 e 2021.**



Fonte: Elaboração própria. \*Imagem elaborada no programa R.

**Figura 4: Predição espacial das Rajadas do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) no estado do Rio Grande do Sul nos anos de 2020 e 2021.**

Com base na Figura 2 observa-se que, de modo geral, as áreas a oeste, noroeste e em parte do centro apresentam predomínio de ventos na direção ESE; as áreas ao sul, parte do centro e no norte têm predomínio de ventos nas direções E e ENE; A mesorregião Metropolitana de Porto Alegre apresenta ventos predominantemente nas direções E e SE; e as regiões nordeste e leste apresentam ventos nas direções NNE, NE e ENE.

A elaboração da Figura 2 foi realizada utilizando o método kNN, pois os dados de direção do vento foram categorizados em 16 classes. Estudos anteriores, como os de Bonisch et al. (2004), Yamamoto et al. (2012) e Costa et al. (2019), também aplicaram métodos de interpolação espacial a dados categóricos, demonstrando diferentes abordagens para esse tipo de variável. Trata-se, portanto, de um tema que ainda apresenta desafios e permanece em aberto na literatura.

A partir das Figuras 3 e 4 verifica-se predomínio de maiores velocidades (tendendo a valores maiores que  $3 \text{ m.s}^{-1}$ ) e rajadas (tendendo a valores maiores que  $6 \text{ m.s}^{-1}$ ) de vento superficial nas áreas mais ao sul e litoral do RS; já as menores velocidades e rajadas de vento superficial são visualizadas em áreas mais ao norte e noroeste do RS. O atlas eólico do Rio Grande do Sul (SEMC, 2002) e o atlas de potencial eólico brasileiro (AMARANTE et al., 2001) indicam o potencial eólico da região do litoral sul do Brasil com ventos predominantes leste-nordeste com mais de  $7 \text{ m.s}^{-1}$  a 50 metros de altura.

Vale ressaltar que a variabilidade do vento pode ser influenciada por fatores externos não considerados diretamente neste estudo. Pesquisas futuras poderiam incorporar modelos de circulação atmosférica e variáveis orográficas para fornecer uma avaliação mais abrangente de como esses fatores afetam a dinâmica do vento no Rio Grande do Sul.

O entendimento do comportamento do vento pode auxiliar em projetos arquitetônicos e agrícolas, projetos eólicos e na prevenção de danos causados por ventos fortes, de modo que os resultados podem fornecer subsídios para políticas de mitigação de desastres naturais e para o planejamento territorial sustentável. Assim, mais pesquisas são necessários para investigar todas as características e dinâmicas do vento, ampliando a série temporal de análise, considerando interações espaço-temporais e associando com as possíveis consequências para a população do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

## 4 CONCLUSÃO

Tanto para as mesorregiões quanto para as estações do ano, há predomínio de ventos nas direções leste e leste-sudeste, sendo ventos concentrados e com pouca variabilidade direcional.

Os ventos apresentam maiores velocidades médias e maiores rajadas médias na região Sul e litoral do estado do Rio Grande do Sul. Já as menores velocidades e menores rajadas são observadas no Norte/Noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

Assim, este estudo contribui para o entendimento da variabilidade espacial e temporal dos ventos no Rio Grande do Sul. Evidencia-se a influência das mesorregiões sobre a dinâmica dos ventos, reforçando a importância de análises regionais detalhadas.

## 5 REFERÊNCIAS

Agostinelli, C. & Lund, U. (2022). R package 'circular': Circular Statistics (version 0.4-95). <https://r-forge.r-project.org/projects/circular/>.

Almeida, L. O., Lima, M G., Esteves, I. C. A., Munhoz, G. S., & Medeiros-Junior, R. A. (2021). Updating the Brazilian wind speed map for structural design. *Structural Engineering and Mechanics*. 79(5), 557-564. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.79.5.557>.

Alves, E. D. L., & Silva, S. T. (2011). Direção e velocidade do vento em uma floresta de transição amazônia-cerrado no norte de Mato Grosso, Brasil. *Boletim Goiano de Geografia*, 31(1), 63-74. <https://doi.org/10.5216/bgg.V31i1.15400>.

Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J. & Sá, A. L. (2001). *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Brasília.

Araújo Júnior, G. N., Queiroz, M. G., Jardim, A. M. R. F., Silva, M. J., Pereira, P. C., & Silva, T. G. F. (2019). Caracterização da direção predominante, velocidade máxima e média do vento do município de Petrolina-PE. *Pensar acadêmico*, 17(1), 43-49. <https://doi.org/10.21576/pa.2019v17i1.363>.

Back, A. J. (2020). Informações climáticas e hidrológicas dos municípios catarinenses (com programa HidroClimaSC). Epagri.

Bárbara Neto, M., Boeira, L. S., Neves, L. A., & Terra, V. S. S. (2021). Velocidades e direções predominantes dos ventos associadas a períodos secos e chuvosos em uma bacia litorânea. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(11), 98-108. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0010>.

Bonisch, S., Assad, M. L. L., Monteiro, A. M. V., & Câmara, G. (2004). Representação e propagação de incertezas em dados de solo. II - Atributos numéricos. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 28(1), 33-47. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100004>.

Borges, T. K. S., Oliveira, A. S., & Silva, N. D. (2018). Análise da velocidade e direção dos ventos em Cruz das Almas, Bahia, no período 1973-2001. *Revista Semiárido De Visu*, 6(3), 122-134. <https://periodicos.ifsertao-pe.edu.br/ojs2/index.php/semiaridodevisu/article/view/446>.

Castelhamo, F. J., & Roseghini, W. F. F. (2018). Caracterização da dinâmica dos ventos em Curitiba-PR. *GEOUSP*, 22(1), 227-240. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2018.123088>.

Costa, H. S., Seidel, E. J., Pazini, J. B., Silva, A. M., Silva, F. F., Martins, J. F. S., Barrigossi, J. A. F. (2019). Mapping of spatiotemporal distribution of *Tibraca limbativentris* Stal (Hem.: Pentatomidae) in flooded rice crop in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia*, 63(3), 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.rbe.2019.04.001>.

Dinno, A. (2017). dunn.test: Dunn's Test of Multiple Comparisons Using Rank Sums. R package version 1.3.5. <https://CRAN.R-project.org/package=dunn.test>.

Favera, A. C. D., Luiz, E. W., Schuch, N. J., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2012) Potencial eólico no Rio Grande do Sul - Distribuição estatística dos ventos na região central do estado. *Revista Geográfica Acadêmica*, 6(1), 38-51.

Fisher, N. I. (1993). *Statistical Analysis of Circular Data* (1. ed.). University Press.

Komsta, L., & Novomestky, F. (2015). moments: Moments, cumulants, skewness, kurtosis and related tests. R package version 0.14. <https://CRAN.R-project.org/package=moments>.

Lima, R. G., & Bittencourt, L. S. (2017). A influência de diferentes arranjos construtivos no comportamento da ventilação natural. *Urbe. Revista Brasileira De Gestão Urbana*, 9, 425-441. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.009.SUPL1.AO013>.

Mendiburu, F. (2021). agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-5. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.



Munhoz, F. C., & Garcia, A. (2008). Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava-SP. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 23(1), 30-34. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000100003>.

Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30(7), 683-691. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012>.

Pewsey, A., Neuhauser, M., & Ruxton, G. D. (2013). Circular Statistics in R (1. ed.). Oxford University Press.

Ponciano, A. C., & Back, A. J. (2022). Caracterização do regime de ventos em Laguna, Santa Catarina. *Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc*, 7(2), 1-14. <https://doi.org/10.18616/civiltec.v7i2.7413>.

Pontes, A. K. S., Dias, G. F. M., & Souza, A. M. L. (2018). Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos no litoral do nordeste paraense. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, 5(1), 33-42.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Ramos, H., Pontes, B., & Pantoja, P. (2021). Análise da direção e da velocidade do vento em Vitória-ES: um estudo preliminar. *Revista Científica Foz*, 1-20.

Rockett, G. C., Telles, P., Barboza, E. G., Gruber, N. L. S., & Simão, C. E. (2017). Análise espaço-temporal dos ventos no extremo norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas Em Geociências*, 44(2), 203–219. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78271>.

Santos, S. D., Seidel, E. J., & Silva, A. M. (2019). *Estudo da direção do vento nas mesorregiões do Rio Grande do Sul* [Resumo expandido]. 64ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBras) e 18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica (SEAGRO), Piracicaba, SP.

Schliep, K., & Hechenbichler, K. (2016). kkn: Weighted k-Nearest Neighbors. R package version 1.3.1. <https://CRAN.R-project.org/package=kkn>.

Secretaria de Energia, Minas e Comunicações (SEMC) (2002). *Atlas eólico: Rio Grande do Sul*. Porto Alegre.

Silva, M. F., & Barbosa, R. V. R. (2022). Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. *Revista Brasileira De Climatologia*, 31(18), 509–538. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15606>.

Silva, R. L., & Vieira, M. M. (2016). DIREÇÃO PREDOMINANTE, VELOCIDADE DO VENTO E SUAS FREQUÊNCIAS DE OCORRÊNCIA EM DOURADOS-MSS. *ENERGIA NA AGRICULTURA*, 31(4), 348–355. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2016v31n4p348-355>.

Silva, J. B., Zanusso, J. T., Silveira, D. L. M., Schons, R. L., & Larroza, E. G. (1997). Estudo da velocidade e direção dos ventos em Pelotas, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(2), 227-235.

Sobral, B. S., Oliveira Júnior, J. F. de ., Gois, G. de ., Terassi, P. M. de B., & Pereira, C. R. (2018). Regime de Vento na Serra do Mar - Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 33(3), 441–451. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333004>.



Terassi, P. M. B., Oliveira-Júnior, J. F., Galvani, E., Correia Filho, W. L. F., Góis, G., Sobral, B. S., & Biffi, V. H. R. (2019). Regime de ventos em Curitiba e Paranaguá, Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25, 294-318. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.65645>.

Yamamoto, J. K., Mao, X. M., Koike, K., Crosta, A. P., Landim, P. M. B., Hu, H. Z., Wang, C. Y., Yao, L. Q. (2012). Mapping an uncertainty zone between interpolated types of a categorical variable. *Computers & Geosciences*, 40 (1), 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.09.005>.

Wahrlich, J., Silva, F. A., Campos, C. G. C., Rodrigues, M. L. G., & Medeiros, J. (2018). Characterization of the predominant wind speed and direction in Santa Catarina, Brazil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 23, 356-373. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.57115>.

Wollmann, C. A., & Galvani, E. (2012). Caracterização climática regional do Rio Grande do Sul: dos estudos estáticos ao entendimento da gênese. *Revista Brasileira de Climatologia*, 11, 87-103. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v11i0.28586>.

World Meteorological Organization (WMO) (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)*.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Santos, S. D., Leonardi, I. S., Cassenote, M. de D., Silva, A. M., & Seidel, E. J. Variabilidade regional do vento no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *HOLOS*, 7(41). <https://doi.org/10.15628/holos.2025.15955>

#### ABOUT THE AUTHORS:

##### S. D. SANTOS

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2854-0378>

##### I. S. LEONARDI

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

ORCID:<https://orcid.org/0009-0009-7769-9757>

##### M. D. CASSENOTE

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

ORCID:<https://orcid.org/0009-0004-9719-1049>

##### A.M. SILVA

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-3230-3343>

**E. J. SEIDEL**

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9656-0699>

**Editor :** Francinaide de Lima Silva Nascimento

***Ad Hoc* Reviewer:** Rafael Vieira do Vale



**Received:** August 31, 2023

**Accepted:** October 23, 2025

**Published:** December 30, 2025

