

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA - REGIÃO DA UTE CANDIOTA III

ANEXO II – CLIMA E METEOROLOGIA

Índice

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	Comportamento Climático e Dispersão de Poluentes.....	5
1.2	Classificação climática de Köppen-Geiger	7
2	SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES NA REGIÃO	10
2.1	Ocorrências de El Niño e La Niña.....	11
2.2	Regime de Ventos – Análise da Rosa dos Ventos (2020-2025)	17
3	CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA (1961-2025).....	28
3.1	Temperatura Média do Ar.....	28
3.2	Temperatura Máxima do Ar	30
3.3	Temperatura Mínima do Ar.....	31
3.4	Precipitação Pluviométrica	33
3.5	Pressão Atmosférica Média.....	34
3.6	Umidade Relativa do Ar.....	36
3.7	Insolação	38
3.8	Número de Dias com Chuva	39
4	VALIDAÇÃO DO MODELO METEOROLÓGICO WRF (2020-2025)	41
5	CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA (2020-2024).....	47
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
7	REFERÊNCIAS.....	53

Lista de Tabelas

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO REGIME DE VENTOS EM CANDIOTA, RS (2020 – 2025)	20
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DO REGIME DE VENTOS EM CANDIOTA, RS (2024).....	27
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DO REGIME DE VENTOS EM CANDIOTA, RS (2024).....	28
TABELA 4 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR (°C) ENTRE O MODELO WRF E AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO INMET	43
TABELA 5 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR (%) ENTRE O MODELO WRF E AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO INMET	44
TABELA 6 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO (M/S) ENTRE O MODELO WRF E AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO INMET	44
TABELA 7 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO DO PONTO DE ORVALHO (°C) ENTRE O MODELO WRF E AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO INMET	45
TABELA 8 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA (HPA) ENTRE O MODELO WRF E AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO INMET	46
TABELA 9 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO (MM) ENTRE O MODELO WRF E AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO INMET	47

Lista de Figuras

FIGURA 1 – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA PARA O BRASIL KÖPPEN (1936).....	9
FIGURA 2 – ROSA DOS VENTOS – VERÃO (2020–2025), CANDIOTA/RS	18
FIGURA 3 – ROSA DOS VENTOS – OUTONO (2020–2024), CANDIOTA/RS.	18
FIGURA 4 – ROSA DOS VENTOS – INVERNO (2020–2025), CANDIOTA/RS.	19
FIGURA 5 – ROSA DOS VENTOS – PRIMAVERA (2020–2025), CANDIOTA/RS.	20
FIGURA 6 - ROSA DOS VENTOS MENSAL – CANDIOTA/RS (JANEIRO A DEZEMBRO DE 2025)	23
FIGURA 7 – ROSA DOS VENTOS MENSAL – CANDIOTA/RS (JANEIRO A DEZEMBRO DE 2025)	25
FIGURA 8 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DO AR EM BAGÉ (1961–2025).....	30
FIGURA 9 – TEMPERATURA MÁXIMA MENSAL EM BAGÉ (1961–2025).....	31
FIGURA 10 – TEMPERATURA MÍNIMA MÉDIA MENSAL EM BAGÉ (1961–2025).....	33
FIGURA 11 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL EM BAGÉ (1961–2024)	34
FIGURA 12 – PRESSÃO ATMOSFÉRICA MÉDIA MENSAL EM BAGÉ (1961–2025)	36
FIGURA 13 – UMIDADE RELATIVA MÉDIA MENSAL DO AR EM BAGÉ (1961–2025)	37
FIGURA 14 – INSOLAÇÃO MÉDIA MENSAL (HORAS DE BRILHO SOLAR) EM BAGÉ (1961–2025).....	39
FIGURA 15 – NÚMERO MÉDIO MENSAL DE DIAS COM CHUVA EM BAGÉ (1961–2025).....	40
FIGURA 16 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO	42
FIGURA 17 – VARIAÇÃO MENSAL DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA MÉDIA (2020–2024).....	48
FIGURA 18- VARIAÇÃO SAZONAL DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA MÉDIA (2020–2024)	48
FIGURA 19 – VARIAÇÃO MENSAL DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÉDIA (2020–2024).	49
FIGURA 20 – VARIAÇÃO SAZONAL DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÉDIA (2020–2024).....	49

FIGURA 21 – VARIAÇÃO MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO AR (2020–2024).....	50
FIGURA 22 – VARIAÇÃO SAZONAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO AR (2020–2024)	50
FIGURA 23 – VARIAÇÃO MENSAL DA UMIDADE RELATIVA MÉDIA (2020–2024).	51
FIGURA 24 – VARIAÇÃO SAZONAL DA UMIDADE RELATIVA MÉDIA (2020–2024).....	51
FIGURA 25 – VARIAÇÃO MENSAL DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA (2020–2024).....	52
FIGURA 26 – VARIAÇÃO SAZONAL DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA (2020–2024) EM FATOR 1000 (0,6 MM EQUIVALE A 600). 52	

Lista de Quadros

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO EL NIÑO E LA NIÑA (1961 – 2025)	14
--	----

1 INTRODUÇÃO

A caracterização das condições climáticas e meteorológicas é um componente essencial na análise ambiental, especialmente em regiões com atividades industriais e geração de energia, como o município de Candiota, no estado do Rio Grande do Sul. O conhecimento detalhado do comportamento atmosférico permite compreender os processos de dispersão de poluentes, transporte de massas de ar e variações sazonais que influenciam diretamente a qualidade do ar e o conforto ambiental.

A análise das variáveis meteorológicas é, também, importante para a calibração e validação de modelos numéricos, como o *Weather Research and Forecasting* (WRF), amplamente utilizado em estudos de modelagem atmosférica e previsão do tempo. Dessa forma, este relatório apresenta uma avaliação das condições climáticas e meteorológicas observadas na região de Candiota, abrangendo o período de 2020 a 2024, com o objetivo de subsidiar análises de dispersão atmosférica e compreender a influência das variabilidades sazonais e interanuais sobre a dinâmica local do clima.

Para prever como os poluentes atmosféricos se dispersam e como impactam a qualidade do ar, é essencial compreender o comportamento do tempo e do clima. Esses elementos determinam a forma como os poluentes se movem, se concentram ou se dissipam na atmosfera. Por isso, é importante estudar os principais sistemas atmosféricos atuantes na região, observando como cada um pode favorecer ou dificultar a dispersão dos poluentes.

1.1 COMPORTAMENTO CLIMÁTICO E DISPERSÃO DE POLUENTES

A compreensão do comportamento climático e das condições meteorológicas é essencial para avaliar a dispersão dos poluentes atmosféricos, especialmente em regiões com atividades industriais e termoeletricas, como o município de Candiota, no Rio Grande do Sul. A variabilidade dos elementos meteorológicos, como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa, vento, pressão atmosférica e precipitação, exerce influência direta sobre os processos de transporte, diluição e remoção dos contaminantes presentes na atmosfera (Seinfeld e Pandis, 2016).

A dispersão dos poluentes está fortemente associada à estrutura térmica da atmosfera e à circulação dos ventos. Em condições de instabilidade atmosférica, quando há intenso aquecimento da superfície e predominância de movimentos convectivos, ocorre uma

mistura vertical mais eficiente das massas de ar, favorecendo a diluição e o transporte dos poluentes. Por outro lado, durante períodos de estabilidade, característicos das noites frias e dos invernos secos, a formação de inversões térmicas limita o movimento vertical do ar, retraindo os poluentes próximos à superfície (Jacobson, 2005). Esse fenômeno é especialmente relevante em Candiota, onde a topografia suavemente ondulada e a ocorrência frequente de inversões térmicas no inverno contribuem para o acúmulo de material particulado e gases nas camadas mais baixas da atmosfera.

A direção e a velocidade dos ventos também exercem papel fundamental no comportamento dos poluentes. Ventos mais fortes aumentam a dispersão horizontal e reduzem as concentrações locais, enquanto períodos de calmaria favorecem a estagnação e o acúmulo das concentrações. O aumento da temperatura e a redução da umidade relativa intensificam as reações fotoquímicas, favorecendo a formação de ozônio troposférico e de outros poluentes secundários (Brandt et al., 2013). A radiação solar também influencia diretamente a química atmosférica. A maior incidência solar observada no verão potencializa as reações fotoquímicas e acelera a conversão de poluentes primários, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, em poluentes secundários, como ozônio e nitratos (Finlayson-Pitts e Pitts, 2000). No inverno, a menor disponibilidade de radiação e o resfriamento noturno favorecem a formação de camadas estáveis, limitando a mistura vertical e contribuindo para o confinamento dos poluentes próximos ao solo.

Portanto, o comportamento climático da região de Candiota apresenta forte sazonalidade, que condiciona a dispersão e a concentração de poluentes atmosféricos. Durante o verão e a primavera predominam condições de instabilidade, ventos mais intensos e alta radiação solar, resultando em maior capacidade de dispersão. No outono e no inverno, a estabilidade atmosférica, as inversões térmicas e a menor incidência de radiação reduzem a ventilação e favorecem o acúmulo de poluentes, principalmente material particulado fino (PM_{2.5}) e gases como dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), frequentemente associados às emissões de usinas termoeletricas. Essas variações demonstram a importância de integrar os dados meteorológicos locais às análises de qualidade do ar e aos modelos de simulação atmosférica, permitindo avaliar a eficiência das medidas de controle de emissões e prever condições críticas para a saúde humana e o meio ambiente.

1.2 CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER

A análise climática da região de Candiota, localizada no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, foi conduzida com base na classificação de Köppen-Geiger (Figura 1), amplamente reconhecida na climatologia por descrever regimes térmicos e pluviométricos a partir de séries históricas de dados meteorológicos. O município de Candiota enquadra-se na classe Cfa, correspondente ao clima subtropical úmido com verão quente. Essa classificação caracteriza um regime climático com verões de temperaturas elevadas, invernos frios a amenos e precipitação bem distribuída ao longo do ano, sem a presença de uma estação seca definida.

De acordo com a metodologia proposta por Köppen (1936) e revisada por Lima et al. (2023), a notação Cfa é composta por três letras que sintetizam as principais características do clima. A letra “C” identifica climas temperados ou subtropicais, nos quais a temperatura média do mês mais frio varia entre 0 °C e 18 °C (ou -3 °C e 18 °C, conforme a adaptação regional), enquanto a média do mês mais quente é superior a 10 °C, refletindo um regime de latitudes médias, com estações bem definidas e ausência de extremos térmicos acentuados. A letra “f” representa a inexistência de uma estação seca, sendo a precipitação do mês mais seco superior a 30 mm. Por fim, a letra “a” indica verões quentes, com temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, diferenciando-se dos verões amenos ou frios.

O comportamento térmico da região de Candiota é marcado por verões quentes e invernos frios a amenos, com ocorrência eventual de geadas. A amplitude térmica anual é moderada, resultado da influência marítima e da alternância entre massas de ar tropicais e polares. Durante o verão, a instabilidade atmosférica e as altas temperaturas favorecem a convecção e a dispersão de poluentes. No inverno, por outro lado, a estabilidade atmosférica e a ocorrência de inversões térmicas podem reduzir a mistura vertical do ar, promovendo o acúmulo de poluentes próximos à superfície.

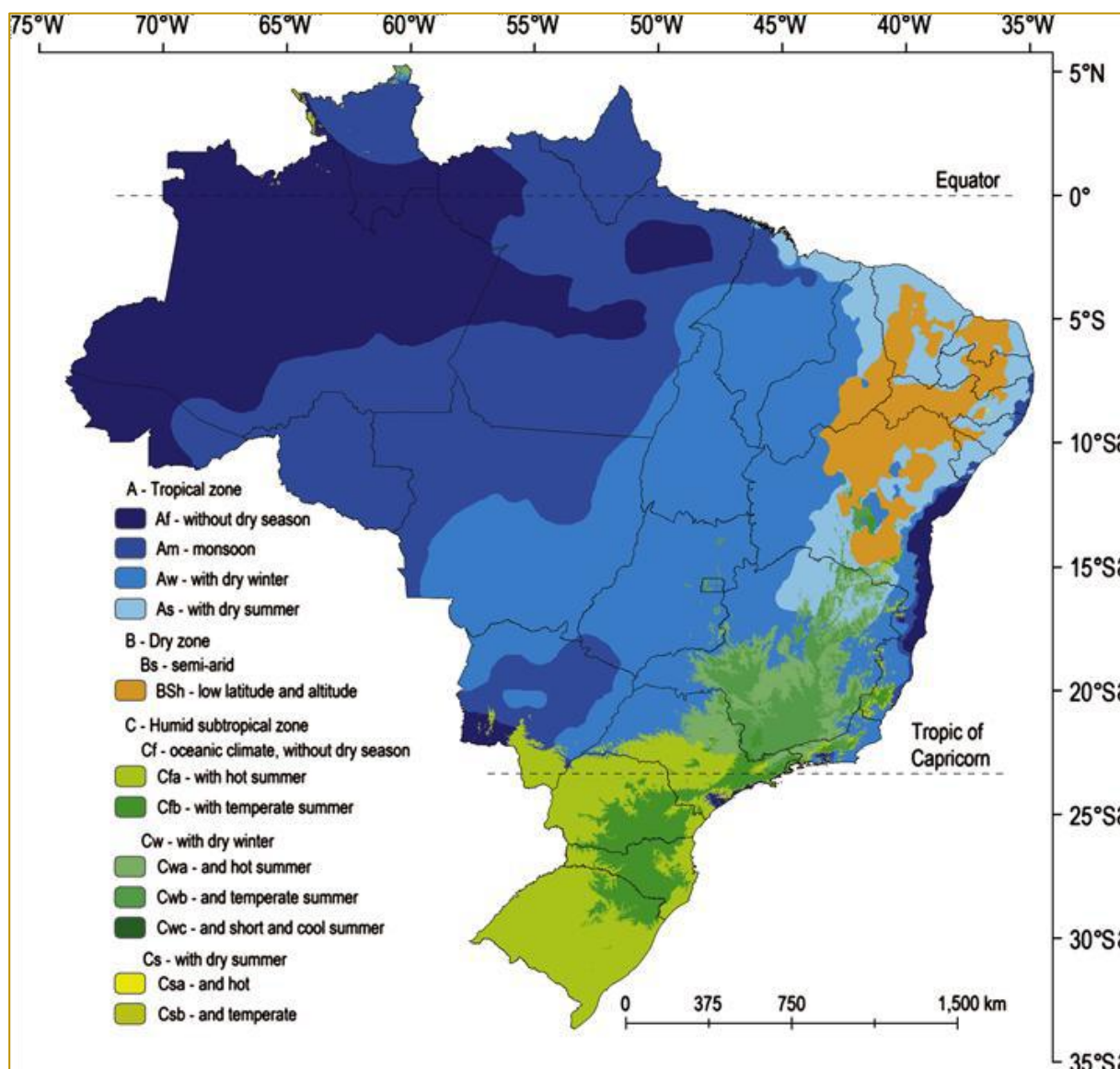
O regime pluviométrico é caracterizado por precipitação bem distribuída ao longo do ano, sem uma estação seca bem definida, o que garante disponibilidade hídrica contínua e favorece as atividades agropecuárias predominantes na região. Essa condição difere dos climas tropicais com inverno seco (Aw) e mediterrâneos com verão seco (Cs), assegurando a manutenção da umidade do solo e o desenvolvimento da vegetação típica do bioma Pampa.

A localização geográfica de Candiota, ao sul do Trópico de Capricórnio, confere à região uma condição de transição climática, sob influência direta da alternância entre massas de ar tropicais, quentes e úmidas, e massas de ar polares, frias e secas. Essa dinâmica atmosférica resulta em elevada variabilidade temporal das condições meteorológicas, marcada pela passagem frequente de frentes frias, variações bruscas de temperatura e episódios recorrentes de instabilidade. Esses fatores são determinantes para os processos de dispersão e transporte de poluentes atmosféricos, especialmente em um contexto de presença de atividades termoelétricas no município.

O clima Cfa está intimamente associado ao bioma Pampa, característico da Campanha Gaúcha, com predominância de formações campestres e vegetação herbácea adaptada às variações sazonais de temperatura e precipitação. A combinação entre umidade elevada e verões quentes cria condições propícias à estabilidade ecológica, sustentando uma rica biodiversidade e favorecendo as práticas agrícolas e pecuárias extensivas da região.

A caracterização climática de uma região é essencial para compreender não apenas a dispersão dos poluentes atmosféricos, mas também o comportamento médio da atmosfera e suas variações ao longo do tempo. Esse tipo de análise é fundamental para o planejamento urbano, a defesa civil, a gestão de recursos hídricos, a agricultura e a saúde pública, contribuindo para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças ambientais e aos eventos extremos.

Figura 1 – Classificação climática para o Brasil Köppen (1936).



Fonte: Lima et al. (2023).

Além dos dados meteorológicos tradicionais, como precipitação, temperatura e insolação, outras variáveis também são importantes na caracterização climática, incluindo o saldo de radiação, a evapotranspiração de referência e os parâmetros do balanço hídrico, como evapotranspiração real, déficit e excesso de água no solo. A análise conjunta dessas variáveis fornece uma compreensão mais completa do comportamento atmosférico, permitindo identificar períodos de seca, excesso hídrico e seus impactos sobre o ambiente e as atividades humanas.

Com esse propósito, o presente estudo teve como objetivo caracterizar o regime climático da região de Candiota por meio da análise de variáveis meteorológicas. Para tanto, foram utilizadas séries históricas obtidas na estação meteorológica de Bagé, operada pelo

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Essa estação foi escolhida por representar de forma adequada as condições atmosféricas da área de estudo e por disponibilizar um conjunto de dados consistente e de longa duração.

2 SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES NA REGIÃO

A dinâmica atmosférica que influencia o sul do Brasil, e em particular a região de Candiota, é marcada pela interação entre diversos sistemas meteorológicos de diferentes escalas, tanto continentais quanto oceânicos. A localização do município, na porção meridional do Rio Grande do Sul e próxima à fronteira com o Uruguai, o expõe à alternância constante entre massas de ar tropicais e polares, bem como à passagem frequente de frentes frias, que exercem papel decisivo no regime de chuvas, temperatura e vento ao longo do ano (Reboita et al., 2010).

Durante o verão, predominam as massas de ar tropicais, especialmente a Massa Tropical Atlântica, que se forma sobre o oceano Atlântico subtropical e transporta ar quente e úmido para o continente. Essa massa contribui para o aumento das temperaturas e da umidade relativa do ar. Em alguns períodos, há também influência da Massa Tropical Continental, oriunda do centro-oeste do Brasil, caracterizada por ar quente e seco, que favorece temperaturas mais elevadas e redução da nebulosidade. Essas condições resultam em instabilidade convectiva e formação de chuvas de curta duração, típicas da estação (Grimm et al., 1998; Reboita et al., 2010).

No outono e inverno, a influência das massas de ar polares se torna mais intensa, associada principalmente à Massa Polar Atlântica, que se desloca do sul do continente em direção ao norte após a passagem das frentes frias. Esse sistema é responsável por quedas significativas de temperatura, aumento da pressão atmosférica e períodos de tempo estável e seco, frequentemente acompanhados por formação de geadas (Reboita et al., 2010; INMET, 2025). Em Candiota, as incursões de ar polar são frequentes entre maio e setembro e estão relacionadas à formação de inversões térmicas, que reduzem a dispersão dos poluentes na baixa atmosfera (Jacobson, 2005).

As frentes frias representam outro sistema de grande importância para a região, resultantes do encontro entre massas de ar de características distintas, geralmente o ar frio polar e o ar quente tropical. Elas provocam mudanças bruscas nas condições meteorológicas, com aumento da nebulosidade, intensificação dos ventos e ocorrência de

chuvas. A frequência média de frentes frias no sul do Brasil varia entre seis e dez eventos por mês, sendo mais elevada durante o inverno e a primavera (Grimm et al., 1998; Reboita et al., 2010).

Durante o verão, observa-se também a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se manifesta como uma faixa de nebulosidade persistente estendendo-se da Amazônia até o oceano Atlântico. Embora seu núcleo principal ocorra em latitudes mais baixas, seus efeitos podem alcançar o Rio Grande do Sul, favorecendo a ocorrência de precipitações contínuas e episódios de instabilidade (Carvalho et al., 2004).

Outro sistema relevante é o Jato de Baixos Níveis (JBN), uma corrente de ventos intensos que se estende da Amazônia em direção ao sul do continente, transportando calor e umidade. Quando esse jato interage com frentes frias, há intensificação da convecção e aumento da probabilidade de eventos de chuva intensa, afetando diretamente o regime pluviométrico da região (Marengo et al., 2004; Vera et al., 2006).

De forma geral, o clima de Candiota resulta da alternância entre períodos dominados por massas tropicais quentes e úmidas e fases influenciadas por massas polares frias e secas. Essa interação constante gera uma alta variabilidade meteorológica, caracterizada por rápidas mudanças de temperatura, nebulosidade e direção dos ventos. A combinação desses fatores explica o comportamento típico do clima subtropical úmido da Campanha Gaúcha, marcado por contrastes sazonais e elevada instabilidade atmosférica.

2.1 OCORRÊNCIAS DE EL NIÑO E LA NIÑA

O Quadro 1 apresenta a distribuição temporal dos eventos quentes de El Niño, representados em vermelho, e dos eventos frios de La Niña, representados em azul, identificados no período de 1961 a 2026. A classificação dos fenômenos foi realizada com base no Índice Niño Oceânico (ONI), indicador amplamente utilizado para caracterizar a variabilidade das temperaturas da superfície do mar na região do Pacífico Equatorial. O ONI é determinado a partir da média móvel trimestral das anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região Niño 3.4, delimitada entre as latitudes de 5°N e 5°S e as longitudes de 120°W a 170°W. A identificação dos eventos considera a persistência de anomalias iguais ou superiores a $\pm 0,5$ °C durante períodos consecutivos, permitindo distinguir as fases quente e fria do sistema climático associado ao fenômeno ENSO (El

Niño–Oscilação Sul).

A análise da série histórica evidencia a ocorrência alternada de eventos de El Niño e La Niña ao longo das décadas, demonstrando a variabilidade interanual e interdecadal do sistema climático. No conjunto dos dados apresentados, foram identificados 23 períodos classificados como El Niño e 23 períodos associados à La Niña, além de anos sem classificação específica por não atenderem aos critérios de persistência das anomalias estabelecidos para a identificação dos eventos. Entre os episódios de El Niño, destacam-se os eventos classificados como muito fortes nos períodos de 1982–1983, 1997–1998 e 2015–2016. Esses episódios apresentaram anomalias positivas superiores a 2,0 °C, representando alguns dos eventos mais intensos registrados na série histórica analisada. Também foram identificados eventos fortes nos períodos de 1965–1966, 1972–1973, 1987–1988, 1991–1992 e 2023–2024, além de episódios moderados e fracos distribuídos ao longo das demais décadas.

Os eventos de La Niña também apresentaram diferentes magnitudes e períodos de persistência. Entre os episódios mais intensos, destacam-se os períodos de 1973–1974, 1975–1976, 1988–1989, 1998–1999, 1999–2000, 2007–2008 e 2010–2011, classificados como fortes. Observa-se ainda a ocorrência de eventos moderados e fracos em diferentes momentos da série, evidenciando que a fase fria do ENSO também apresenta variabilidade significativa quanto à intensidade e duração. A distribuição temporal dos eventos demonstra períodos de alternância entre El Niño e La Niña, bem como episódios de persistência prolongada de uma mesma fase.

Um exemplo marcante é a sequência de eventos de La Niña observada entre 2020 e 2023, caracterizada pela manutenção de anomalias negativas do ONI durante vários períodos consecutivos. Esse comportamento foi seguido pela retomada de condições de El Niño a partir de 2023, com intensificação das anomalias positivas ao longo daquele período. Os dados mais recentes também registram a ocorrência de um novo evento de El Niño em 2026, ainda em desenvolvimento no momento da análise. Até o período representado na tabela, observam-se valores positivos crescentes do ONI, alcançando 1,4 °C no trimestre MJJ, o que indica a evolução das condições quentes no Pacífico Equatorial.

As intensidades dos fenômenos foram classificadas de acordo com a magnitude das anomalias da TSM, considerando as seguintes categorias: El Niño ou La Niña fraco, com anomalias entre 0,5 °C e 0,9 °C; moderado, entre 1,0 °C e 1,4 °C; forte, entre 1,5 °C e 1,9

°C; e muito forte, para valores iguais ou superiores a 2,0 °C. Para os eventos de La Niña, são considerados os mesmos intervalos em valores negativos.

A identificação e classificação desses fenômenos são particularmente relevantes para a compreensão da variabilidade climática regional, uma vez que o ENSO exerce influência significativa sobre a circulação atmosférica, a distribuição das precipitações e o comportamento das temperaturas em diferentes regiões do planeta. No Brasil, seus efeitos apresentam características distintas entre as regiões, podendo favorecer o aumento ou a redução dos volumes de chuva conforme a fase do fenômeno e a época do ano.

Na região Sul do Brasil, incluindo o Rio Grande do Sul, os episódios de El Niño estão frequentemente associados à alteração dos padrões de precipitação, enquanto os eventos de La Niña podem favorecer condições de menor disponibilidade hídrica em determinados períodos. Entretanto, a resposta regional não é uniforme e depende da interação entre o ENSO e outros sistemas atmosféricos de escala regional e global.

Dessa forma, o Quadro 1 constitui uma importante base para a interpretação das variações pluviométricas e meteorológicas observadas na área de estudo. A identificação dos períodos de ocorrência e da intensidade dos fenômenos El Niño e La Niña permite estabelecer relações entre a variabilidade oceânica-atmosférica do Pacífico Equatorial e os padrões climáticos registrados localmente, contribuindo para estudos de vulnerabilidade climática, planejamento de recursos hídricos e elaboração de estratégias de adaptação e contingência.

Quadro 1 – Classificação El Niño e La Niña (1961 – 2025).

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	ANOS	CLASSIFICAÇÃO	INTENSIDADE
1961	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	1961 - 1962		
1962	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	1962 - 1963		
1963	-0.4	-0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1963 - 1964	El Niño	Moderado
1964	1.1	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	1964 - 1965	La Niña	Fraca
1965	-0.6	-0.3	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.2	1.5	1.9	2.0	2.0	1.7	1965 - 1966	El Niño	Forte
1966	1.4	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	1966 - 1967		
1967	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	1967 - 1968		
1968	-0.6	-0.7	-0.6	-0.4	0.0	0.3	0.6	0.5	0.4	0.5	0.7	1.0	1968 - 1969	El Niño	Moderado
1969	1.1	1.1	0.9	0.8	0.6	0.4	0.4	0.5	0.8	0.9	0.8	0.6	1969 - 1970	El Niño	Fraco
1970	0.5	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.7	-0.9	-1.1	1970 - 1971	La Niña	Moderada
1971	-1.4	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.0	-0.9	1971 - 1972	La Niña	Fraca
1972	-0.7	-0.4	0.1	0.4	0.7	0.9	1.1	1.4	1.6	1.8	2.1	2.1	1972 - 1973	El Niño	Forte
1973	1.8	1.2	0.5	-0.1	-0.5	-0.9	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7	-1.9	-2.0	1973 - 1974	La Niña	Forte
1974	-1.8	-1.6	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8	-0.6	1974 - 1975	La Niña	Fraca
1975	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.4	-1.6	-1.7	1975 - 1976	La Niña	Forte
1976	-1.6	-1.2	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.8	1976 - 1977	El Niño	Fraco
1977	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8	1977 - 1978	El Niño	Fraco
1978	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.0	1978 - 1979		
1979	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6	1979 - 1980	El Niño	Fraco
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0	1980 - 1981		
1981	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	1981 - 1982		
1982	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2.0	2.2	2.2	1982 - 1983	El Niño	Muito Forte
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-0.9	1983 - 1984	La Niña	Fraca

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	ANOS	CLASSIFICAÇÃO	INTENSIDADE
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1	1984 - 1985	La Niña	Fraca
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	1985 - 1986		
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2	1986 - 1987	El Niño	Moderado
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	1987 - 1988	El Niño	Forte
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8	1988 - 1989	La Niña	Forte
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	1989 - 1990		
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	1990 - 1991		
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5	1991 - 1992	El Niño	Forte
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	1992 - 1993		
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	1993 - 1994		
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1	1994 - 1995	El Niño	Moderado
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	1995 - 1996	La Niña	Moderada
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	1996 - 1997		
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4	1997 - 1998	El Niño	Muito Forte
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	1998 - 1999	La Niña	Forte
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7	1999 - 2000	La Niña	Forte
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	2000 - 2001	La Niña	Fraca
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	2001 - 2002		
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1	2002 - 2003	El Niño	Moderado
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	2003 - 2004		
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	2004 - 2005	El Niño	Fraco
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	2005 - 2006	La Niña	Fraca
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9	2006 - 2007	El Niño	Fraco
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6	2007 - 2008	La Niña	Forte

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA
ANEXO II – CLIMA E METEOROLOGIA

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	ANOS	CLASSIFICAÇÃO	INTENSIDADE
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	2008 - 2009	La Niña	Fraca
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6	2009 - 2010	El Niño	Moderado
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	2010 - 2011	La Niña	Forte
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0	2011 - 2012	La Niña	Moderada
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2	2012 - 2013		
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	2013 - 2014		
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	2014 - 2015	El Niño	Fraco
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6	2015 - 2016	El Niño	Muito Forte
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	2016 - 2017	La Niña	Fraca
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0	2017 - 2018	La Niña	Fraca
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8	2018 - 2019	El Niño	Fraco
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	2019 - 2020		
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2	2020 - 2021	La Niña	Moderada
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0	2021 - 2022	La Niña	Fraca
2022	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8	2022 - 2023	La Niña	Moderada
2023	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.3	1.6	1.8	1.9	2.0	2023 - 2024	El Niño	Forte
2024	1.8	1.5	1.1	0.7	0.4	0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	2024 - 2025		
2025	-0.6	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	2025 - 2026		
2026	-0.4	-0.2	0.1	0.5	0.9	1.4							2026 - 2027	El Niño	em desenvolvimento

Fonte: Adaptado de < Fonte: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>

2.2 REGIME DE VENTOS – ANÁLISE DA ROSA DOS VENTOS (2020-2025)

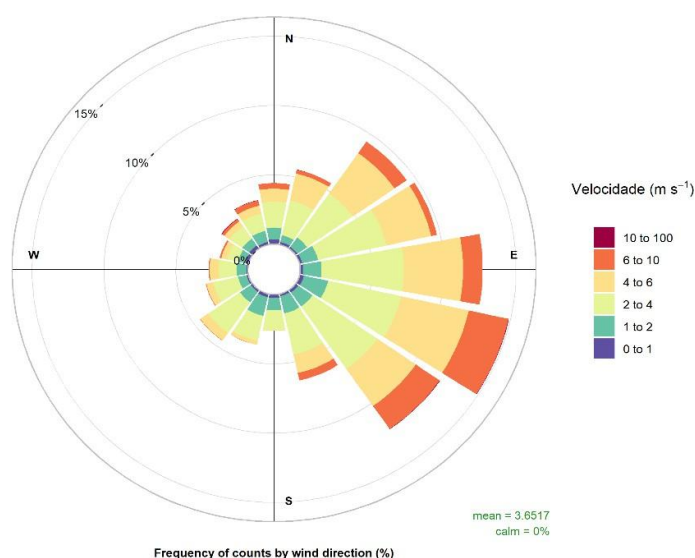
A análise do regime de ventos constitui uma etapa fundamental para a caracterização das condições meteorológicas da região de Candiota, especialmente por sua influência sobre os processos de transporte e dispersão atmosférica. A Rosa dos Ventos é uma ferramenta gráfica que permite representar simultaneamente a frequência de ocorrência dos ventos segundo sua direção e as respectivas classes de velocidade, possibilitando a identificação dos principais padrões de circulação atmosférica predominantes na área de estudo.

Para esta análise, foram utilizados registros meteorológicos horários referentes ao período de 2020 a 2025, organizados sazonalmente nas quatro estações do ano: verão, outono, inverno e primavera. A avaliação conjunta desses dados permite identificar a variabilidade do comportamento dos ventos ao longo do ano, considerando tanto sua distribuição direcional quanto sua intensidade. De modo geral, observa-se que o regime de ventos apresenta distribuição predominante nos setores Leste, Nordeste e Sudeste, embora a participação relativa das diferentes direções varie entre as estações. As rosas dos ventos também permitem visualizar a predominância das classes de velocidade mais baixas e moderadas, bem como a ocorrência de velocidades superiores em determinados setores direcionais.

A Figura 2 apresenta a distribuição dos ventos durante o verão no período analisado. Observa-se maior concentração dos registros nos setores Leste e Sudeste, com participação também expressiva da direção Nordeste. A representação gráfica evidencia uma distribuição direcional assimétrica, indicando maior frequência de circulação proveniente dos quadrantes orientais. Quanto à intensidade, predominam as classes de velocidade entre 2 e 4 m/s e 4 e 6 m/s, com ocorrência de velocidades mais elevadas principalmente nos setores de maior frequência direcional.

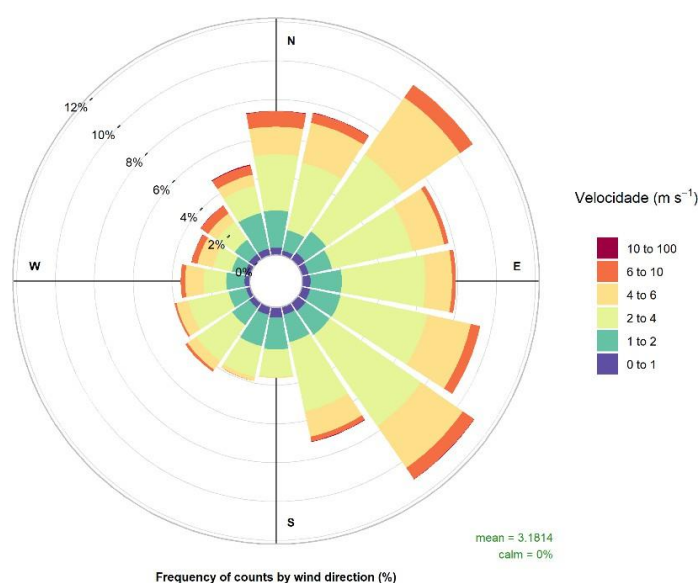
A análise das rosas sazonais permite, portanto, compreender a dinâmica do regime de ventos e suas variações ao longo do ciclo anual. Essas informações são relevantes para a interpretação das condições de ventilação atmosférica da região e para estudos relacionados ao transporte e à dispersão de poluentes, especialmente em áreas sob influência de atividades industriais e termoeletrica.

Figura 2 – Rosa dos Ventos – Verão (2020–2025), Candiota/RS.



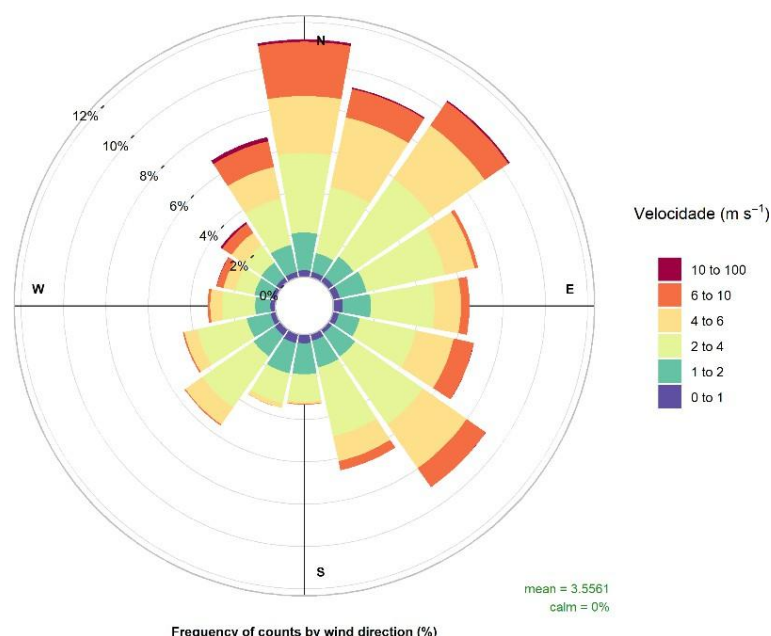
No outono (Figura 3), observou-se predominância dos ventos provenientes dos setores Nordeste (NE), Leste (E) e Sudeste (SE), com destaque para a direção Nordeste. A velocidade média registrada foi de 3,18 m/s, a menor entre as quatro estações analisadas. Apesar da menor intensidade média, a ocorrência de calmarias foi de 0%, indicando a presença de circulação de vento durante todo o período considerado. A distribuição das classes de velocidade mostra maior concentração nas faixas de 2 a 4 m/s e 4 a 6 m/s, enquanto as velocidades superiores a 6 m/s ocorreram com menor frequência, sobretudo nos setores de maior predominância direcional.

Figura 3 – Rosa dos Ventos – Outono (2020–2024), Candiota/RS.



Durante o inverno (Figura 4), observou-se maior frequência de ventos provenientes dos setores Norte (N), Nordeste (NE) e Leste (E), destacando-se a direção Norte como a de maior ocorrência. A velocidade média registrada foi de 3,56 m/s, valor intermediário entre as quatro estações analisadas. A ocorrência de calmarias foi de 0%, indicando a presença contínua de circulação de vento no período analisado. A distribuição das classes de velocidade evidencia maior concentração nas faixas de 2 a 4 m/s e 4 a 6 m/s, com ocorrência também de velocidades superiores a 6 m/s, especialmente nos setores Norte, Nordeste e Sudeste. Esse comportamento caracteriza o inverno como uma estação de ventos predominantemente moderados e com distribuição direcional relativamente ampla.

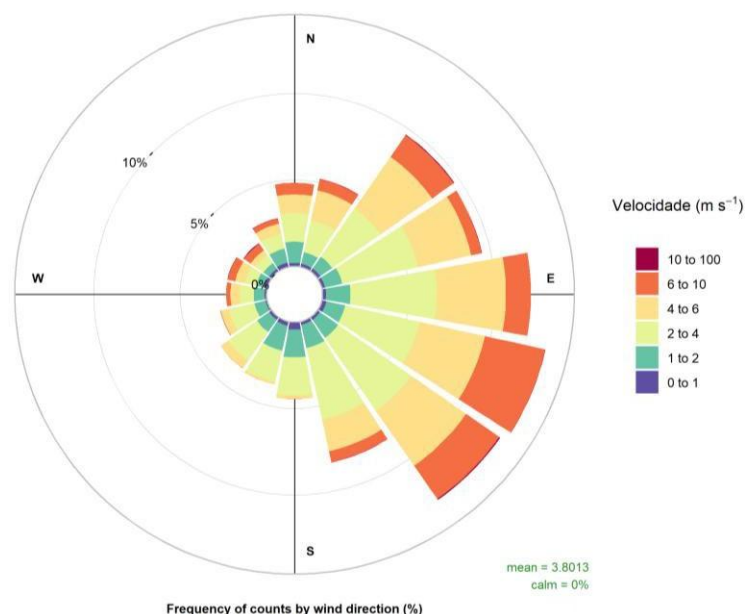
Figura 4 – Rosa dos Ventos – Inverno (2020–2025), Candiota/RS.



A primavera (Figura 5) apresentou o comportamento mais dinâmico entre as estações analisadas, com maior intensidade média dos ventos. A distribuição direcional evidenciou predominância dos ventos provenientes dos setores Leste (E), Sudeste (SE) e Nordeste (NE), com destaque para o setor Leste. A velocidade média atingiu 3,80 m/s, sendo a maior entre as quatro estações analisadas. A ocorrência de calmarias foi de 0%, indicando circulação de vento durante todo o período considerado. Observou-se ainda maior participação das classes de velocidade entre 2 e 4 m/s e 4 e 6 m/s, além de ocorrências mais expressivas de ventos superiores a 6 m/s, especialmente nos setores Leste e Sudeste. Esses resultados caracterizam a primavera como a estação de maior intensidade média dos ventos e elevada atividade

atmosférica no período analisado.

Figura 5 – Rosa dos Ventos – Primavera (2020–2025), Candiota/RS.



Ao longo dos seis anos analisados (2020–2025), verifica-se que o regime de ventos de Bagé, RS, apresenta variações sazonais tanto na direção quanto na intensidade. As direções predominantes foram E-SE no verão e na primavera, SE no outono e N no inverno, evidenciando diferenças no comportamento direcional do vento entre as estações. A intensidade média dos ventos também apresentou variação sazonal, com valores entre 3,18 m/s no outono e 3,80 m/s na primavera, sendo a primavera a estação com maior velocidade média, seguida pelo verão e inverno. A ocorrência de ventos calmos foi relativamente baixa, variando de 2,58% na primavera a 4,78% no outono, com maior frequência no outono. A tabela a seguir resume as principais características do regime de ventos em Bagé, RS, por estação, permitindo uma comparação entre os diferentes períodos sazonais.

Tabela 1 – Características do regime de ventos em Candiota, RS (2020 – 2025).

CARACTERÍSTICA	VERÃO	OUTONO	INVERNO	PRIMAVERA
VELOCIDADE MÉDIA (M/S)	3,65	3,18	3,56	3,80
VENTOS CALMOS (%)	2,60	4,78	3,82	2,58
DIREÇÕES PREDOMINANTES	E-SE	SE	N	E-SE
NÚMERO DE REGISTROS	9.358	10.618	8.692	10.729

Avaliando o regime de ventos para o ano de 2024 (Figura 6), o município de Bagé (RS) apresentou um comportamento marcado por variações sazonais na direção

predominante dos ventos. Durante os meses de verão, janeiro e fevereiro apresentaram predominância do setor E-SE, enquanto no outono houve maior participação dos ventos de SE. No inverno, observou-se uma mudança no padrão direcional, com predominância de N em junho, seguida por SE em julho e NE em agosto. Na primavera, os ventos apresentaram predominância de NE em setembro, passando para E-SE em outubro, novembro e dezembro. Esse comportamento evidencia a alternância entre os setores Nordeste, Leste-Sudeste, Sudeste e Norte ao longo do ano.

As velocidades médias mensais variaram entre 3,11 m/s, em julho, e 4,22 m/s, em junho, caracterizando um regime de ventos predominantemente moderado. Os maiores valores ocorreram em junho (4,22 m/s), novembro (4,19 m/s), agosto (4,14 m/s) e janeiro (3,87 m/s), enquanto julho apresentou a menor velocidade média. Dessa forma, os períodos de maior intensidade não ficaram restritos ao verão, ocorrendo também durante o inverno e a primavera.

Quanto às condições de calmaria, os valores mensais variaram de 1,53% a 6,74%. O maior percentual ocorreu em julho (6,74%), seguido por maio (3,76%), setembro (3,47%) e março (3,90%), enquanto junho apresentou apenas 1,53%. Assim, embora os ventos calmos tenham representado uma parcela relativamente pequena das observações, sua ocorrência apresentou variação ao longo do ano, com maior frequência em alguns meses de menor intensidade média.

De modo geral, 2024 apresentou um regime de ventos com significativa variabilidade direcional e sazonal, destacando-se a predominância de E-SE no verão e no final da primavera, SE no outono, N em junho e NE durante parte do inverno e início da primavera. A velocidade média também apresentou variações importantes, com os maiores valores ocorrendo em junho, agosto e novembro. Os resultados indicam, portanto, que o regime de ventos de Bagé não é caracterizado por uma única direção predominante ao longo de todo o ano, mas por uma alternância sazonal dos principais setores de circulação.

A Figura 7 apresenta a distribuição mensal do regime de ventos no município de Bagé, no Rio Grande do Sul, para o período de janeiro a dezembro de 2025. As rosas dos ventos foram elaboradas a partir dos registros horários da estação meteorológica, permitindo identificar a frequência de ocorrência dos ventos segundo sua direção predominante e as respectivas classes de velocidade.

A análise mensal evidencia uma variabilidade significativa na circulação

atmosférica ao longo do ano. De modo geral, observa-se a predominância de ventos provenientes dos quadrantes Leste e Nordeste, com participação variável das direções Sudeste e Norte. Essa distribuição demonstra que o regime de ventos apresenta comportamento dinâmico, com alterações tanto na direção predominante quanto na intensidade ao longo dos meses.

Durante os meses de verão, especialmente janeiro, fevereiro e março, verifica-se maior concentração dos ventos nos setores Leste, Sudeste e Nordeste. Janeiro apresenta uma distribuição mais concentrada no quadrante leste-sudeste, enquanto fevereiro evidencia maior participação dos ventos de Nordeste. Em março, observa-se novamente a predominância das direções Nordeste e Leste, acompanhada de ocorrência de classes de velocidades mais elevadas.

No outono, representado pelos meses de abril, maio e junho, ocorre uma mudança gradual na distribuição direcional. Abril mantém significativa contribuição dos setores Nordeste e Leste, enquanto maio apresenta uma distribuição mais ampla entre os quadrantes Norte, Leste e Sul. Em junho, observa-se maior participação dos ventos provenientes do Norte, com distribuição relativamente equilibrada entre outras direções.

Durante o inverno, nos meses de julho e agosto, o regime de ventos apresenta alterações na intensidade e na direção predominante. Julho evidencia maior participação dos setores Nordeste e Leste, enquanto agosto apresenta uma distribuição mais diversificada, com ocorrência expressiva de ventos dos quadrantes Norte, Leste e Sudeste. Essas características refletem a maior variabilidade da circulação atmosférica associada à atuação de diferentes sistemas meteorológicos durante a estação fria.

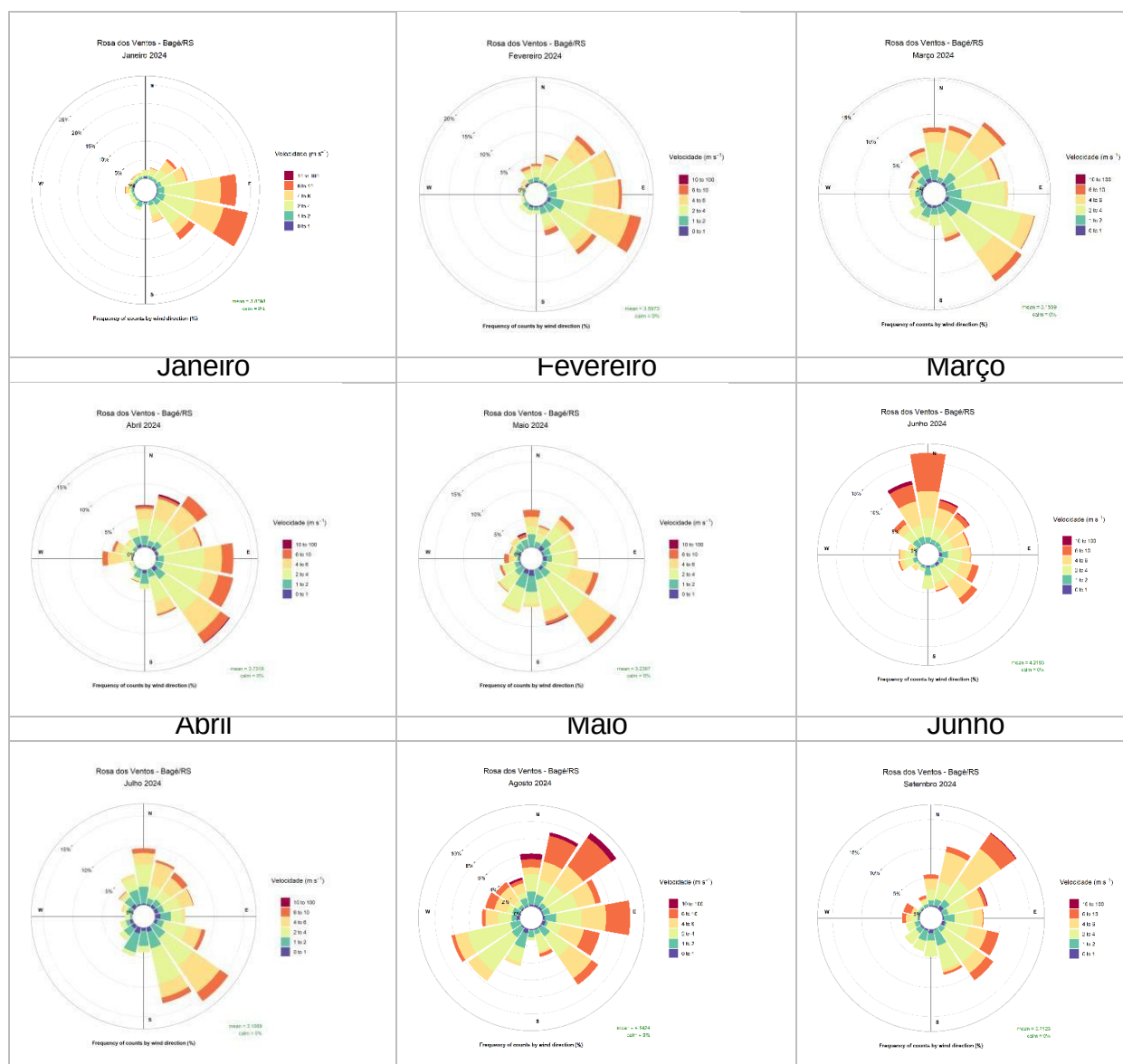
Na primavera, setembro, outubro e novembro apresentam novamente uma maior concentração dos ventos nos setores Leste e Nordeste. Setembro destaca-se pela forte predominância dos ventos de Leste, enquanto outubro apresenta uma distribuição mais ampla, com participação importante dos quadrantes Nordeste e Leste. Em novembro, observa-se a manutenção da predominância dos ventos de Leste, acompanhada por contribuição relevante dos setores Norte e Nordeste.

Em dezembro, mês de transição para o verão, verifica-se uma distribuição relativamente ampla das direções, com destaque para os setores Nordeste, Leste e Sudeste. A presença de classes de maior velocidade nesses quadrantes indica a continuidade de um regime de ventos predominantemente associado à circulação dos setores orientais.

De forma geral, a análise das rosas dos ventos mensais demonstra que o regime eólico de Bagé apresenta predominância dos setores Leste e Nordeste ao longo de grande parte de 2025, embora ocorram variações sazonais e mensais importantes. A representação das classes de velocidade permite observar que os ventos mais frequentes concentram-se nas categorias de baixa a moderada intensidade, enquanto as maiores velocidades ocorrem de forma mais localizada, principalmente nos quadrantes de maior predominância direcional.

Os resultados evidenciam a importância da análise mensal para a compreensão da dinâmica atmosférica local, uma vez que a caracterização sazonal isolada pode não representar integralmente as variações de direção e intensidade observadas ao longo do ano.

Figura 6 - Rosa dos Ventos Mensal – Candiota/RS (janeiro a dezembro de 2024)



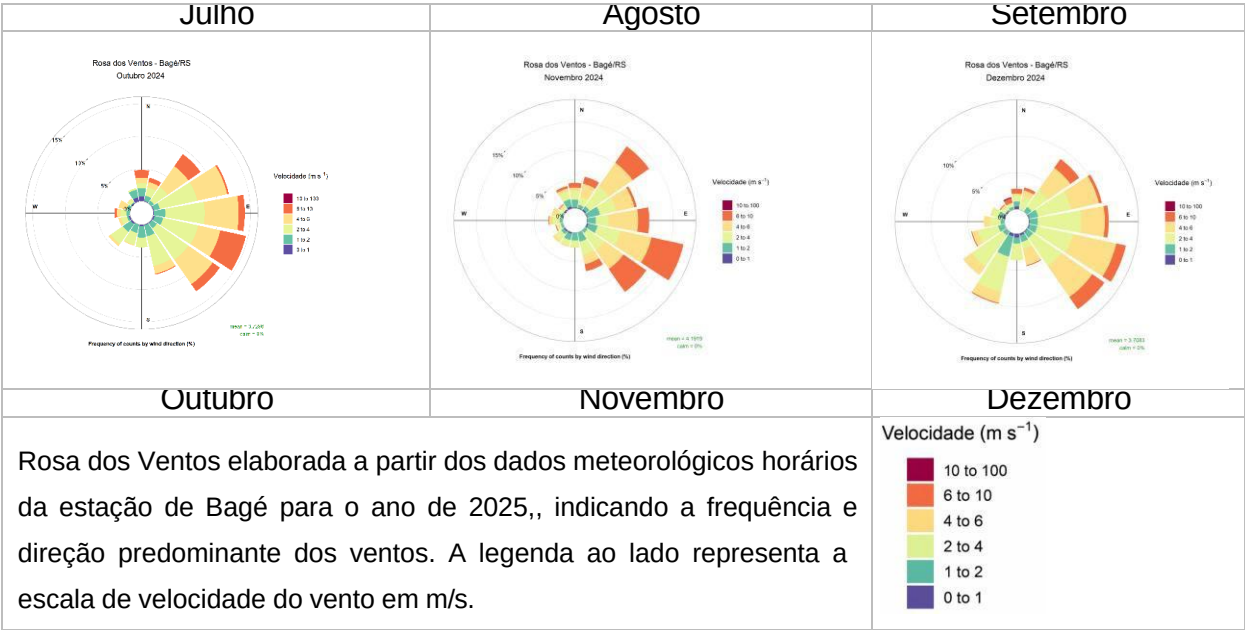
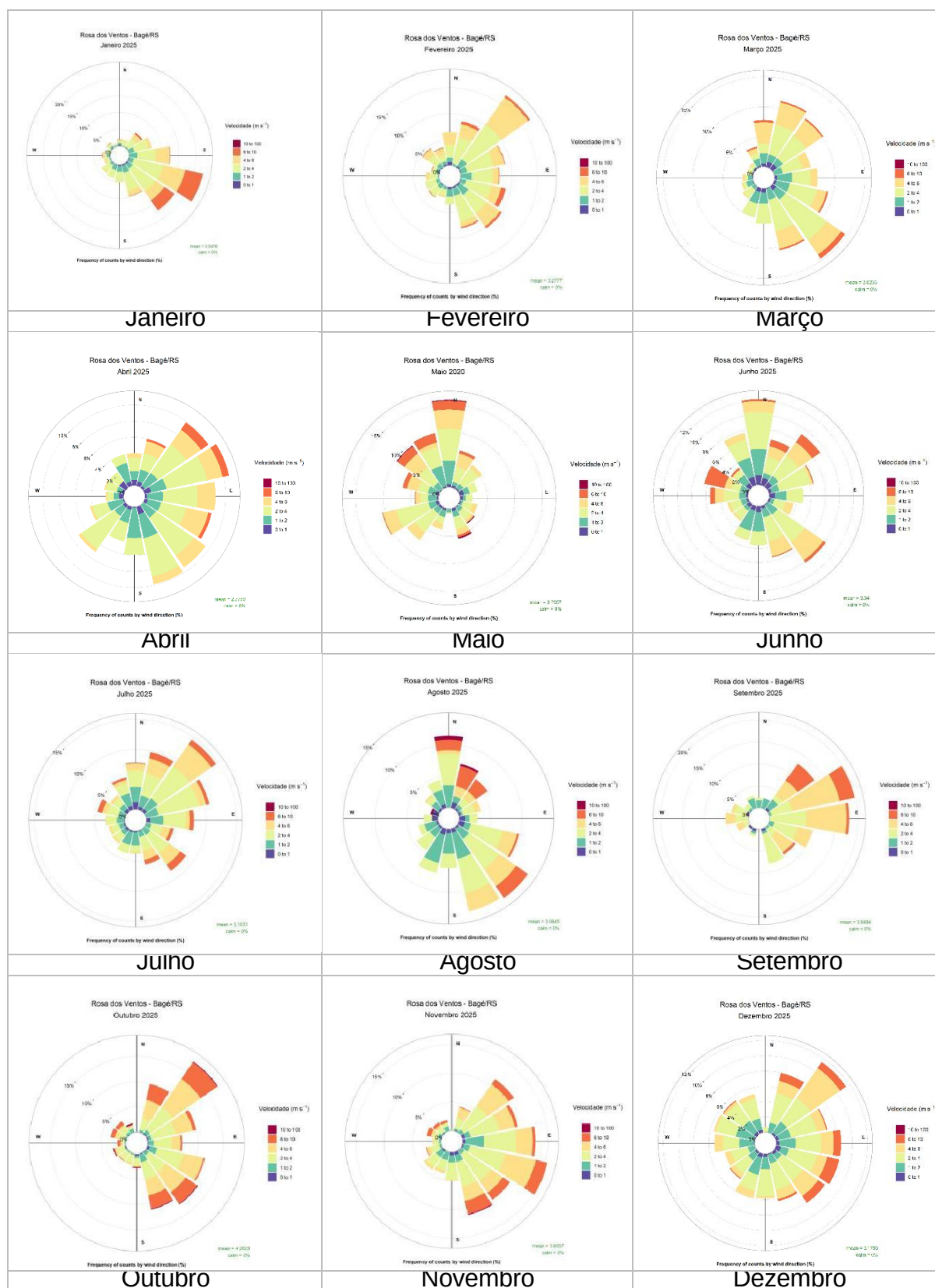


Figura 7 – Rosa dos Ventos Mensal – Candiota/RS (janeiro a dezembro de 2025)



Rosa dos Ventos elaborada a partir dos dados meteorológicos horários da estação de Bagé para o ano de 2025, indicando a frequência e direção predominante dos ventos. A legenda ao lado representa a escala de velocidade do vento em m/s.



A Tabela 2 apresenta as principais características do regime de ventos observadas em Bagé (RS) ao longo de 2024, considerando a velocidade média, o percentual de calmarias e a direção predominante dos ventos em cada mês.

Durante o ano, as velocidades médias mensais variaram entre 3,11 e 4,22 m/s. O menor valor foi registrado em julho (3,11 m/s), enquanto a maior velocidade média ocorreu em junho (4,22 m/s). Também se destacaram novembro (4,19 m/s), agosto (4,14 m/s) e janeiro (3,87 m/s), indicando maior intensidade dos ventos nesses períodos.

Em relação às calmarias, os valores variaram de 1,81% a 6,74%. O maior percentual foi observado em julho (6,74%), seguido de setembro (3,47%), março (3,90%) e maio (3,76%). Os menores valores ocorreram em novembro (1,81%), outubro (2,15%) e janeiro (2,42%). Esses resultados demonstram que, embora as calmarias ocorram ao longo do ano, sua participação permanece relativamente baixa na maior parte dos meses.

Quanto à direção predominante, observa-se variação ao longo do ano. No início do período, predominam os ventos de E-SE, enquanto entre março e maio destaca-se a direção SE. Em junho, a direção predominante passa para N, seguida novamente por SE em julho. Nos meses de agosto e setembro, predomina NE, retornando a E-SE entre outubro e dezembro.

De modo geral, a tabela evidencia que 2024 apresentou um regime de ventos de intensidade moderada, com variação mensal da direção predominante e ocorrência de calmarias em todos os períodos analisados. Os maiores valores de velocidade não estiveram necessariamente associados às menores calmarias, demonstrando que intensidade e frequência de períodos calmos apresentam comportamentos distintos ao longo do ano.

Tabela 2 – Características do regime de ventos em Candiota, RS (2024)

Mês	Velocidade Média (m/s)	Calmarias (%)	Direção Predominante
Janeiro	3,87	2,42	E-SE
Fevereiro	3,60	2,44	E-SE
Março	3,16	3,90	SE
Abril	3,73	3,47	SE
Maio	3,24	3,76	SE
Junho	4,22	1,53	N
Julho	3,11	6,74	SE
Agosto	4,14	2,45	NE
Setembro	3,71	3,47	NE
Outubro	3,73	2,15	E-SE
Novembro	4,19	1,81	E-SE
Dezembro	3,71	2,02	E-SE

A Tabela 3 apresenta as principais características do regime de ventos observadas em Bagé (RS) ao longo de 2025, considerando a velocidade média, o percentual de calmarias e a direção predominante dos ventos em cada mês. Durante o ano, as velocidades médias mensais variaram entre 2,78 e 4,26 m/s. O menor valor foi registrado em abril (2,78 m/s), enquanto a maior velocidade média ocorreu em outubro (4,26 m/s). Também se destacaram setembro (3,95 m/s), novembro (3,66 m/s) e janeiro (3,55 m/s), caracterizando os períodos de maior intensidade dos ventos.

Em relação às calmarias, os valores variaram entre 1,61% e 7,50%. O maior percentual foi observado em junho (7,50%), seguido de agosto (7,17%), abril (6,11%) e março (5,51%). Já os menores valores ocorreram em janeiro (1,61%), outubro (1,75%) e setembro (2,33%). Assim, verifica-se que os períodos de calma ocorreram durante todo o ano, porém com intensidade variável entre os meses. Quanto à direção predominante, observa-se uma alternância entre diferentes setores ao longo do ano. Em janeiro, predominou E-SE, passando para NE em fevereiro e SE em março. Em abril, a direção predominante foi E-NE, enquanto maio apresentou N-NE e junho N. Em julho, voltou a predominar NE, seguida por SE em agosto. Nos meses de setembro e outubro, predominou E-NE e NE, respectivamente, enquanto novembro apresentou E-SE e dezembro NE.

De modo geral, 2025 apresentou um regime de ventos de intensidade moderada e comportamento direcional bastante variável ao longo do ano, com velocidades médias mais elevadas no início e, principalmente, no segundo semestre. As maiores

ocorrências de calmarias concentraram-se entre março e agosto, enquanto os meses de janeiro e outubro apresentaram baixos percentuais de calmaria e velocidades médias relativamente elevadas.

Tabela 3 – Características do regime de ventos em Candiota, RS (2025)

Mês	Velocidade Média (m/s)	Calmarias (%)	Direção Predominante
Janeiro	3,55	1,61	E-SE
Fevereiro	3,28	2,38	NE
Março	3,02	5,51	SE
Abril	2,78	6,11	E-NE
Maio	3,03	5,11	N-NE
Junho	3,04	7,50	N
Julho	3,10	3,76	NE
Agosto	3,06	7,17	SE
Setembro	3,95	2,33	E-NE
Outubro	4,26	1,75	NE
Novembro	3,66	2,50	E-SE
Dezembro	3,18	3,51	NE

3 CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA (1961-2025)

3.1 TEMPERATURA MÉDIA DO AR

A série histórica da estação meteorológica de Bagé, correspondente ao período de 1961 a 2025, representa um registro abrangente das condições climáticas da região da Campanha Gaúcha. A análise das variáveis meteorológicas permite caracterizar o comportamento sazonal do clima local e identificar os principais padrões de temperatura, precipitação e demais elementos atmosféricos ao longo das últimas décadas.

Entre as variáveis analisadas, a temperatura média do ar destaca-se por evidenciar de forma clara a sazonalidade climática regional. A Figura 8 apresenta a distribuição das temperaturas médias mensais para o período histórico avaliado, demonstrando um ciclo anual caracterizado por valores mais elevados durante o verão e redução progressiva das temperaturas ao longo do outono e inverno.

Observa-se que janeiro apresenta a maior temperatura média, com aproximadamente 24 °C, seguido por fevereiro, com cerca de 23 °C. A partir de março, verifica-se uma redução gradual das temperaturas, atingindo valores próximos de

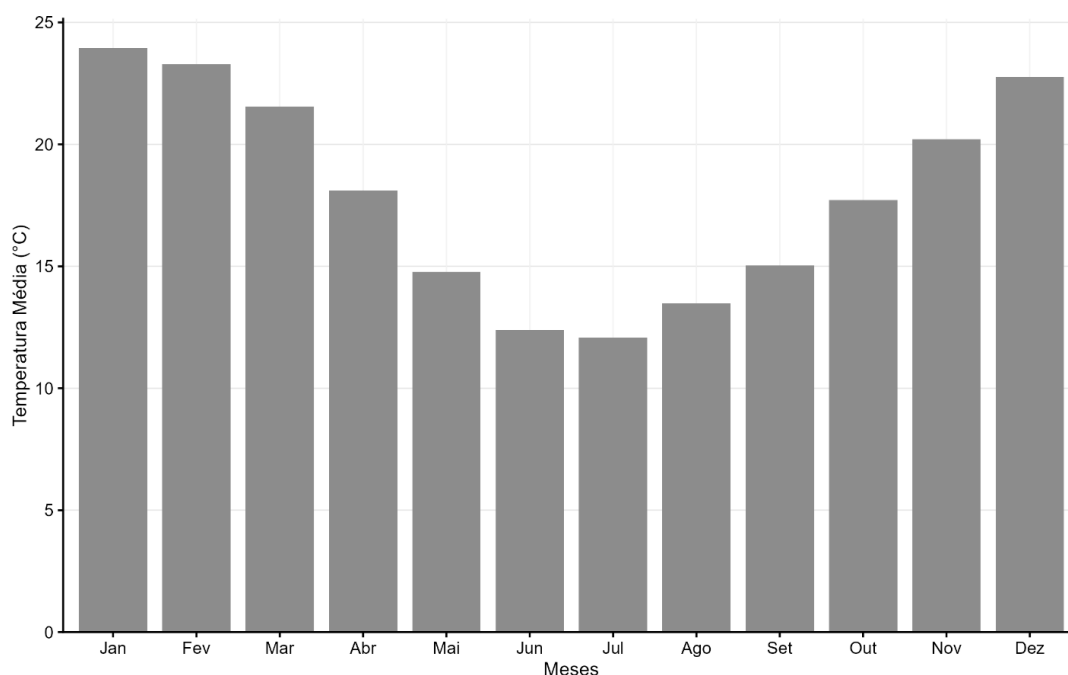
21,5 °C, enquanto abril apresenta média em torno de 18 °C. Durante o outono, essa tendência de resfriamento permanece evidente, com maio registrando aproximadamente 14,7 °C.

Os menores valores de temperatura média ocorrem durante os meses de junho e julho, com aproximadamente 12,4 °C e 12,1 °C, respectivamente, caracterizando o período mais frio do ano. A partir de agosto, inicia-se uma elevação gradual das temperaturas, alcançando cerca de 13,5 °C nesse mês e aproximadamente 15 °C em setembro. Durante a primavera, observa-se a intensificação do aquecimento, com temperaturas médias próximas de 17,7 °C em outubro e 20,2 °C em novembro, culminando novamente em valores mais elevados no verão, com aproximadamente 22,8 °C em dezembro.

A amplitude térmica anual observada entre os meses mais quentes e frios é expressiva, próxima de 12 °C, evidenciando a forte sazonalidade térmica característica da região. Esse comportamento está associado à variação anual da radiação solar e à atuação diferenciada dos sistemas atmosféricos, incluindo a influência de massas de ar frio durante o inverno e o predomínio de condições mais aquecidas nos meses de verão.

De maneira geral, a distribuição mensal da temperatura média evidencia um ciclo climático bem definido, com aquecimento progressivo entre o final do inverno e o verão, seguido de resfriamento gradual durante o outono. A série histórica confirma, portanto, a característica subtropical da região de Bagé, marcada por contrastes térmicos sazonais e variações bem estabelecidas ao longo do ano.

Figura 8 – Temperatura média mensal do ar em Bagé (1961–2025).



3.2 TEMPERATURA MÁXIMA DO AR

A temperatura máxima do ar (Figura 9) apresenta comportamento sazonal semelhante ao observado para a temperatura média, evidenciando um ciclo anual bem definido entre os períodos de maior e menor aquecimento. Os maiores valores são registrados durante os meses de verão, com destaque para janeiro, que apresenta temperatura máxima média superior a 30 °C, seguido por fevereiro, com valores próximos de 29 °C. Dezembro também se destaca, registrando aproximadamente 29 °C, confirmando o predomínio das condições mais quentes no período de verão.

A partir de março, observa-se uma redução gradual das temperaturas máximas, que atingem valores próximos de 27,7 °C, enquanto abril apresenta aproximadamente 24 °C. Durante o outono, a diminuição das temperaturas torna-se mais evidente, com maio registrando cerca de 20,5 °C. Os menores valores são observados nos meses de junho e julho, com aproximadamente 17,8 °C e 17,6 °C, respectivamente, caracterizando o período de menor aquecimento diurno.

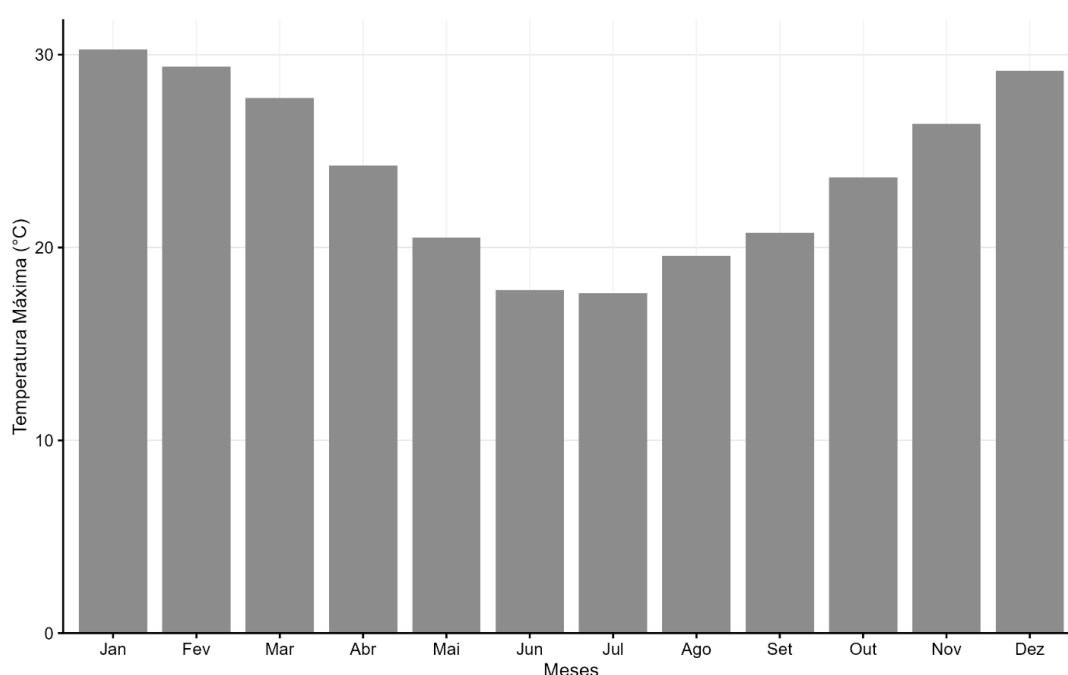
A partir de agosto, inicia-se uma elevação gradual das temperaturas máximas médias, alcançando aproximadamente 19,5 °C nesse mês e 20,7 °C em setembro. Durante a primavera, o aquecimento torna-se mais acentuado, com valores próximos

de 23,5 °C em outubro e 26,3 °C em novembro, antecedendo o retorno às temperaturas elevadas do verão.

A amplitude térmica anual da temperatura máxima é expressiva, com diferença superior a 13 °C entre os valores extremos observados ao longo do ano. Esse comportamento reflete a influência da sazonalidade climática regional, associada à variação da radiação solar incidente e à atuação diferenciada dos sistemas atmosféricos ao longo das estações.

De modo geral, a distribuição mensal da temperatura máxima evidencia que os períodos de verão apresentam maior potencial de aquecimento diurno, enquanto o inverno é caracterizado por temperaturas máximas mais reduzidas. A evolução observada ao longo do ano reforça a presença de um regime térmico sazonal bem definido na região de Bagé/RS.

Figura 9 – Temperatura máxima mensal em Bagé (1961–2025).



3.3 TEMPERATURA MÍNIMA DO AR

A temperatura mínima do ar (Figura 10) apresenta um comportamento sazonal bem definido ao longo da série histórica de Bagé/RS, com maiores valores durante os meses de verão e redução gradual das temperaturas no outono e inverno. Esse padrão evidencia a influência da sazonalidade climática sobre as condições térmicas noturnas e os períodos de menor aquecimento atmosférico.

Os maiores valores de temperatura mínima média são observados em janeiro e fevereiro, ambos com aproximadamente 18 °C, seguidos por março, com cerca de 16,7 °C. A partir de abril, verifica-se uma redução progressiva das temperaturas mínimas, que atingem aproximadamente 13,8 °C nesse mês e 10,9 °C em maio.

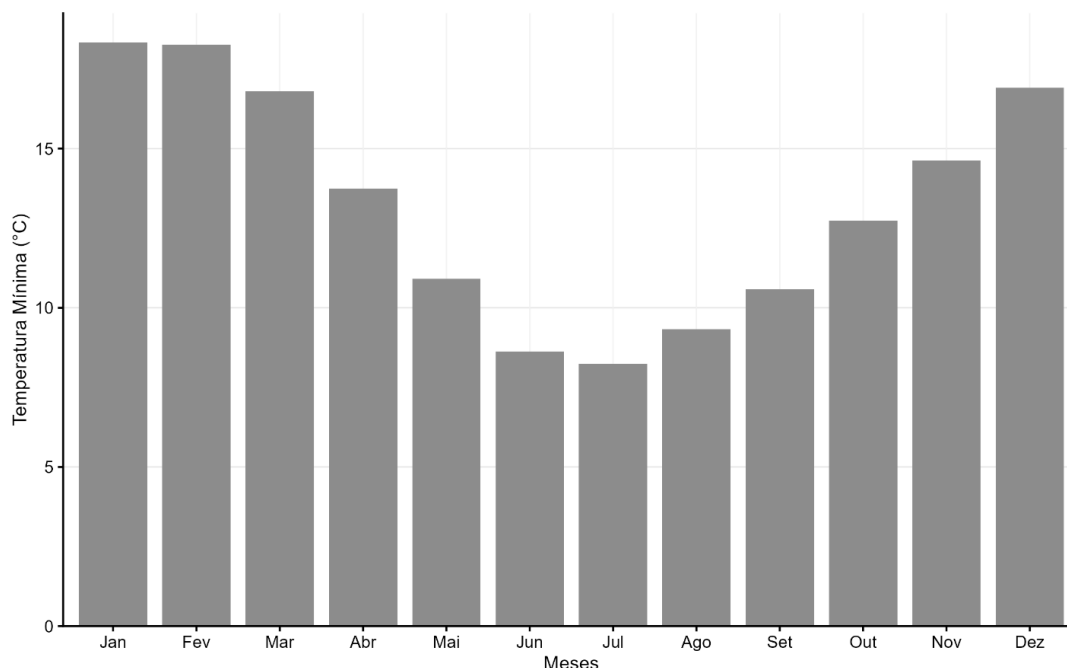
Os menores valores ocorrem durante o inverno, com destaque para julho, que apresenta temperatura mínima média próxima de 8,2 °C, enquanto junho registra aproximadamente 8,6 °C. Esses valores caracterizam o período de menor temperatura mínima média do ano, associado à maior frequência de incursões de massas de ar frio e às condições atmosféricas típicas da estação.

A partir de agosto, observa-se uma elevação gradual das temperaturas mínimas, alcançando aproximadamente 9,3 °C nesse mês e 10,5 °C em setembro. Durante a primavera, o aquecimento torna-se mais evidente, com valores próximos de 12,7 °C em outubro, 14,6 °C em novembro e 16,9 °C em dezembro, antecedendo o retorno às condições mais quentes do verão.

A amplitude térmica anual observada entre as temperaturas mínimas médias mais elevadas e reduzidas é de aproximadamente 10 °C. Essa variação demonstra a dinâmica sazonal do regime térmico regional, refletindo as diferenças na atuação dos sistemas atmosféricos e na disponibilidade de energia para o aquecimento da superfície ao longo do ano.

De modo geral, a distribuição mensal evidencia que o verão apresenta condições noturnas mais amenas, enquanto o inverno concentra os menores valores de temperatura mínima média. O comportamento observado complementa a análise das temperaturas médias e máximas, contribuindo para uma caracterização mais abrangente do regime térmico da região de Bagé.

Figura 10 – Temperatura mínima média mensal em Bagé (1961–2025).



3.4 PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

A precipitação pluviométrica mensal (Figura 11) apresenta uma distribuição relativamente regular ao longo do ano na estação meteorológica de Bagé/RS, embora sejam observadas variações entre os meses. O comportamento evidencia a ocorrência de chuvas durante todo o período anual, sem uma estação seca claramente definida, característica compatível com o regime climático subtropical úmido da região. Os maiores volumes médios mensais de precipitação são observados durante os meses de setembro e outubro, com valores próximos de 150 mm e 155 mm, respectivamente. Esses meses apresentam os maiores acumulados da série mensal representada, indicando maior disponibilidade hídrica durante o início da primavera.

Também se destacam os meses de abril e julho, com precipitações médias próximas de 135 mm, além de fevereiro, que apresenta aproximadamente 128 mm. Esses valores demonstram que volumes significativos de precipitação ocorrem em diferentes períodos do ano, contribuindo para uma distribuição relativamente homogênea das chuvas.

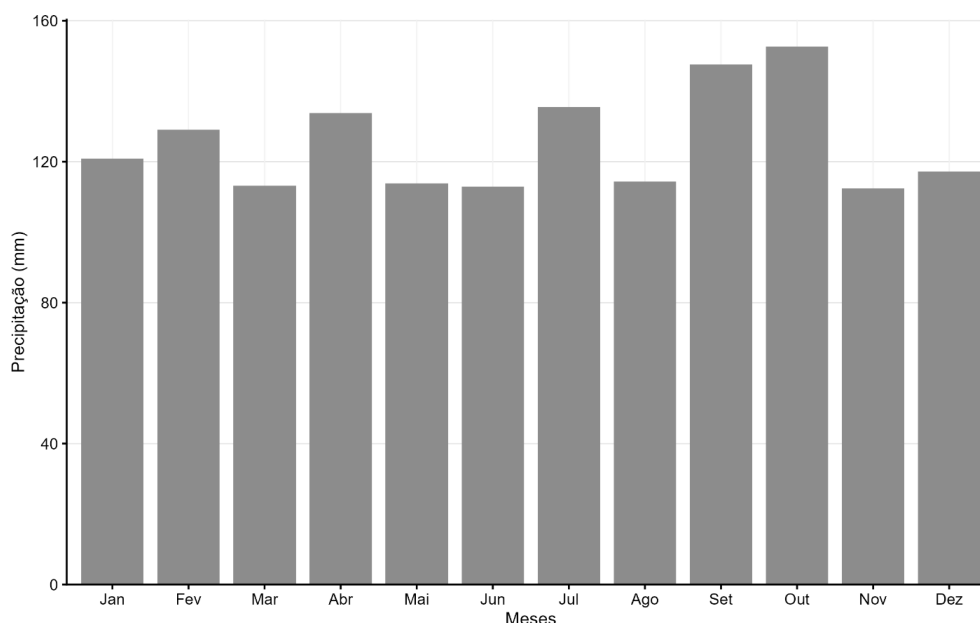
Os menores volumes médios mensais são observados em novembro, com

aproximadamente 112 mm, junho, com cerca de 113 mm, e maio, com aproximadamente 114 mm. Apesar da redução relativa nesses meses, os valores permanecem expressivos, reforçando a ausência de períodos prolongados de estiagem na climatologia regional.

De modo geral, a distribuição mensal da precipitação apresenta variações moderadas ao longo do ano, com maior concentração de chuvas entre o final do inverno e a primavera, especialmente em setembro e outubro. Entretanto, a ocorrência de volumes significativos também durante o verão, outono e inverno demonstra a característica de regularidade pluviométrica da região de Bagé.

A precipitação constitui um importante elemento para a compreensão da dinâmica climática local, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica, as condições do solo, a produção agropecuária e os processos ambientais associados à região.

Figura 11 – Precipitação média mensal em Bagé (1961–2024).



3.5 PRESSÃO ATMOSFÉRICA MÉDIA

A pressão atmosférica média mensal (Figura 12) apresenta um comportamento sazonal bem definido ao longo da série histórica da estação meteorológica de Bagé/RS, caracterizado por uma elevação gradual dos valores durante o outono e inverno, seguida de redução progressiva ao longo da primavera e do verão.

Os menores valores de pressão atmosférica são observados nos meses de janeiro e dezembro, com aproximadamente 984,7 mb e 984,6 mb, respectivamente. Durante o verão, os valores permanecem relativamente baixos, aumentando

gradualmente a partir de fevereiro, março e abril. A partir de maio, observa-se uma elevação mais acentuada da pressão atmosférica, atingindo valores próximos de 990,2 mb. O mês de junho apresenta comportamento semelhante, com aproximadamente 990,3 mb, enquanto o maior valor médio mensal ocorre em julho, alcançando cerca de 991,4 mb.

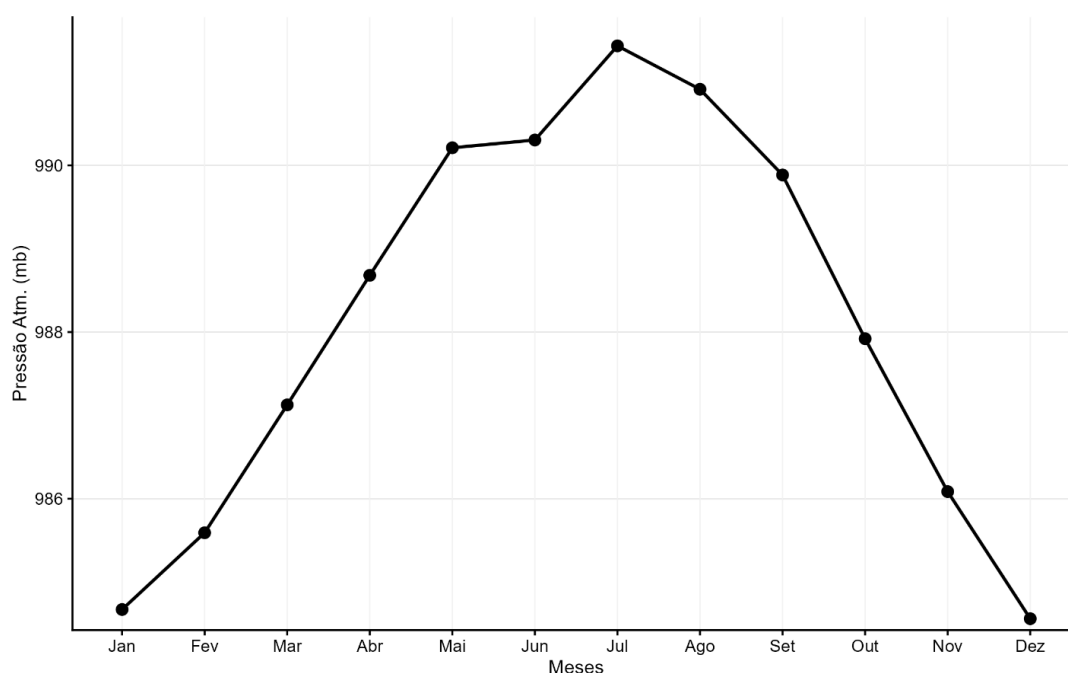
Após o pico registrado em julho, verifica-se uma redução gradual da pressão atmosférica durante o restante do ano. Em agosto, o valor médio é próximo de 990,9 mb, seguido por setembro, com aproximadamente 989,9 mb. A diminuição torna-se mais evidente durante a primavera, com valores próximos de 987,9 mb em outubro e 986,1 mb em novembro.

A variação observada entre os meses de maior e menor pressão atmosférica é de aproximadamente 6,8 mb, evidenciando uma amplitude sazonal relativamente bem definida. Esse comportamento está associado à dinâmica dos sistemas atmosféricos que atuam sobre a região, especialmente à maior influência de sistemas de alta pressão durante os meses mais frios e à presença de condições atmosféricas distintas nos períodos mais quentes.

De modo geral, a distribuição mensal da pressão atmosférica demonstra uma relação sazonal inversa em comparação ao regime térmico, com os maiores valores concentrados no inverno e os menores durante o verão. Essa característica contribui para a compreensão da circulação atmosférica regional e das condições meteorológicas predominantes ao longo do ano. A pressão atmosférica (Figura 12) apresenta comportamento inversamente proporcional à temperatura, atingindo valores mais elevados nos meses frios e reduzindo-se no verão.

Durante o inverno, entre maio e agosto, a pressão aumenta devido à predominância de sistemas de alta pressão e massas de ar frio e denso, que promovem maior estabilidade e redução da nebulosidade. No verão, de dezembro a fevereiro, a pressão média tende a cair em função do aquecimento superficial e da intensificação da convecção, resultando em períodos de instabilidade atmosférica e maior frequência de chuvas. Esse comportamento reflete o equilíbrio dinâmico entre os sistemas de alta e baixa pressão que atuam sazonalmente sobre o sul do país.

Figura 12 – Pressão atmosférica média mensal em Bagé (1961–2025).



3.6 UMIDADE RELATIVA DO AR

A umidade relativa do ar (Figura 13) apresenta variação sazonal ao longo do ano, com valores médios mensais relativamente elevados durante todo o período analisado. O comportamento evidencia a influência da disponibilidade de vapor d'água na atmosfera e sua relação com as condições climáticas predominantes na região de Bagé/RS.

Os menores valores médios de umidade relativa são observados nos meses de janeiro e dezembro, com aproximadamente 65% e 64%, respectivamente. Durante o verão, os valores são relativamente inferiores aos registrados nos meses subsequentes, indicando condições atmosféricas comparativamente menos úmidas.

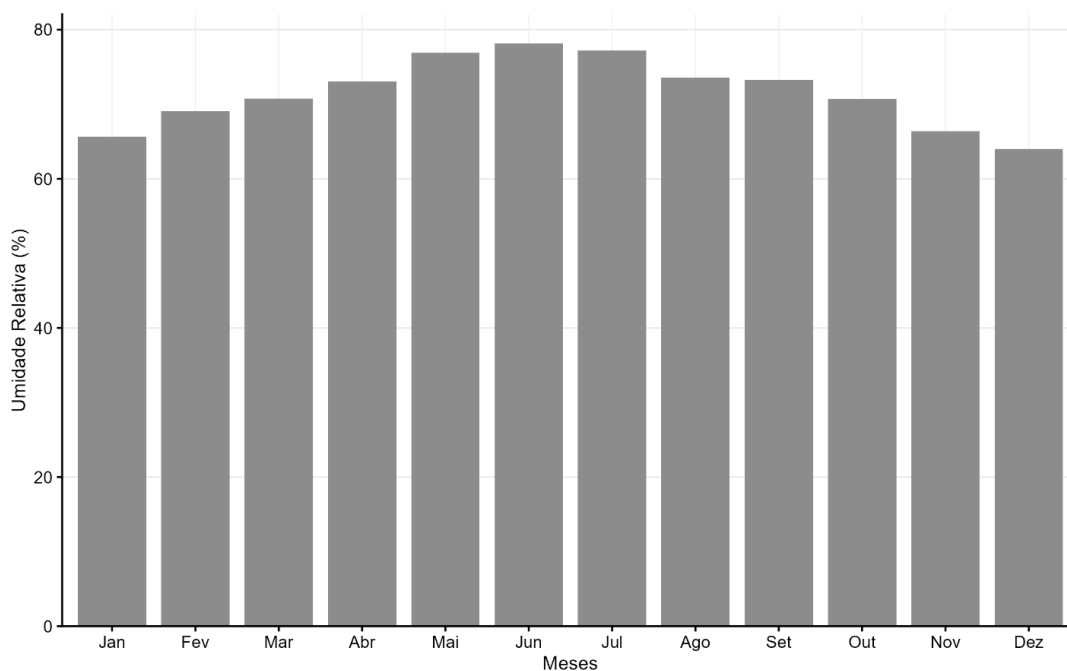
A partir de fevereiro, observa-se uma elevação gradual da umidade relativa, passando por aproximadamente 69% em fevereiro, 71% em março e 73% em abril. Durante o outono, esse aumento torna-se mais evidente, atingindo cerca de 77% em maio.

Os maiores valores médios ocorrem durante o inverno, com aproximadamente 78% em junho e 77% em julho. Esses valores caracterizam o período de maior umidade relativa média do ano. A partir de agosto, observa-se uma redução progressiva, com valores próximos de 73% em agosto e setembro, 71% em outubro e 66% em novembro.

De modo geral, a distribuição mensal demonstra um comportamento sazonal marcado por maiores valores de umidade relativa durante o outono e inverno e redução gradual ao longo da primavera e do verão. A amplitude entre os valores extremos é de aproximadamente 14 pontos percentuais, evidenciando uma variação moderada, porém consistente, ao longo do ciclo anual.

Esse padrão está relacionado à dinâmica atmosférica regional, à variação da temperatura do ar e à disponibilidade de umidade na atmosfera. Os maiores valores observados nos meses mais frios podem estar associados à menor capacidade do ar frio de reter vapor d'água, enquanto os menores valores durante o verão refletem a influência das temperaturas mais elevadas sobre a umidade relativa.

Figura 13 – Umidade relativa média mensal do ar em Bagé (1961–2025).



3.7 INSOLAÇÃO

A insolação média mensal (Figura 14) apresenta um comportamento sazonal bem definido ao longo do ano, com maiores valores concentrados nos meses de verão e primavera e redução durante o outono e inverno. Esse padrão está diretamente relacionado à variação anual da duração do dia e da disponibilidade de radiação solar incidente sobre a superfície.

Os maiores valores médios de insolação são observados nos meses de janeiro e dezembro, com aproximadamente 245 e 252 horas, respectivamente. Esses resultados refletem as condições típicas do verão, quando a maior duração do período diurno favorece o aumento do número de horas de brilho solar. Novembro também apresenta elevada insolação, com aproximadamente 225 horas.

A partir de fevereiro, observa-se uma redução gradual nos valores, embora março ainda apresente aproximadamente 212 horas de insolação. Durante o outono, os valores diminuem progressivamente, atingindo cerca de 176 horas em abril e 158 horas em maio.

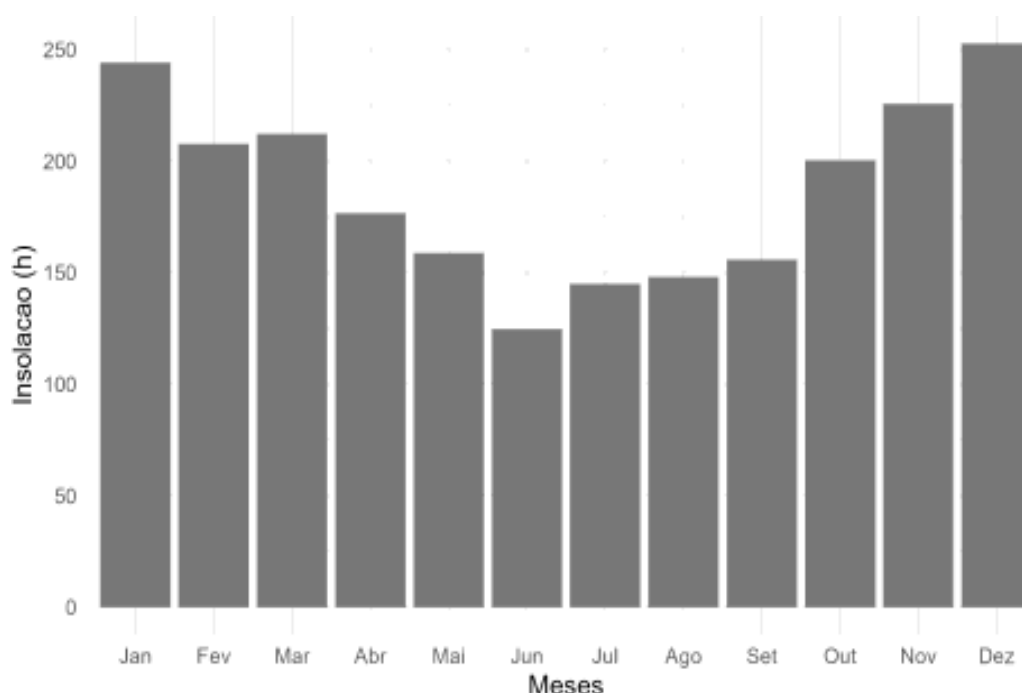
O menor valor médio mensal ocorre em junho, com aproximadamente 124 horas, caracterizando o período de menor disponibilidade de insolação ao longo do ano. Durante o inverno, observa-se uma recuperação gradual, com valores próximos de 145 horas em julho e 148 horas em agosto. Em setembro, a insolação média aumenta para aproximadamente 155 horas.

A partir de outubro, verifica-se uma elevação mais acentuada, alcançando cerca de 200 horas, seguida por valores ainda mais elevados em novembro e dezembro. Esse comportamento evidencia a retomada gradual das condições de maior disponibilidade de radiação solar durante a primavera e o verão.

De modo geral, a distribuição mensal da insolação demonstra uma forte sazonalidade, com amplitude superior a 125 horas entre os meses de maior e menor ocorrência. Os maiores valores são registrados no verão, enquanto o inverno apresenta redução significativa, especialmente em junho. Esse padrão é compatível com a variação sazonal da duração do fotoperíodo e das condições atmosféricas que influenciam a passagem da radiação solar até a superfície.

A insolação constitui um importante indicador climático, apresentando relação direta com o comportamento da temperatura do ar e contribuindo para a compreensão das condições de disponibilidade energética na região de Bagé/RS.

Figura 14 – Insolação média mensal (horas de brilho solar) em Bagé (1961–2025).



3.8 NÚMERO DE DIAS COM CHUVA

O número médio mensal de dias com ocorrência de chuva (Figura 15) apresenta variações ao longo do ano, evidenciando uma distribuição relativamente regular das precipitações na região de Bagé/RS. Diferentemente de uma concentração pluviométrica restrita a determinados meses, observa-se a ocorrência de dias chuvosos durante todo o ano, característica compatível com o regime climático subtropical úmido da região.

Os maiores valores médios são observados entre junho e setembro, com destaque para setembro, que apresenta aproximadamente 10,6 dias com chuva, seguido por julho, com cerca de 10,4 dias, e junho, com aproximadamente 10,3 dias. Esses resultados indicam maior frequência de ocorrência de eventos de precipitação durante o período de inverno e início da primavera.

Durante o verão, o número de dias com chuva apresenta valores relativamente menores. Janeiro registra aproximadamente 8,2 dias, enquanto fevereiro apresenta o maior valor dessa estação, próximo de 10,1 dias. Março apresenta cerca de 9,5 dias com chuva, evidenciando uma redução gradual em relação ao mês anterior.

No outono, observa-se uma diminuição no número de dias chuvosos em abril, com aproximadamente 8,5 dias, seguida de uma elevação em maio, que registra cerca de 9,1 dias. Esse comportamento demonstra que, embora ocorram variações mensais, não há uma interrupção significativa das precipitações ao longo dessa estação.

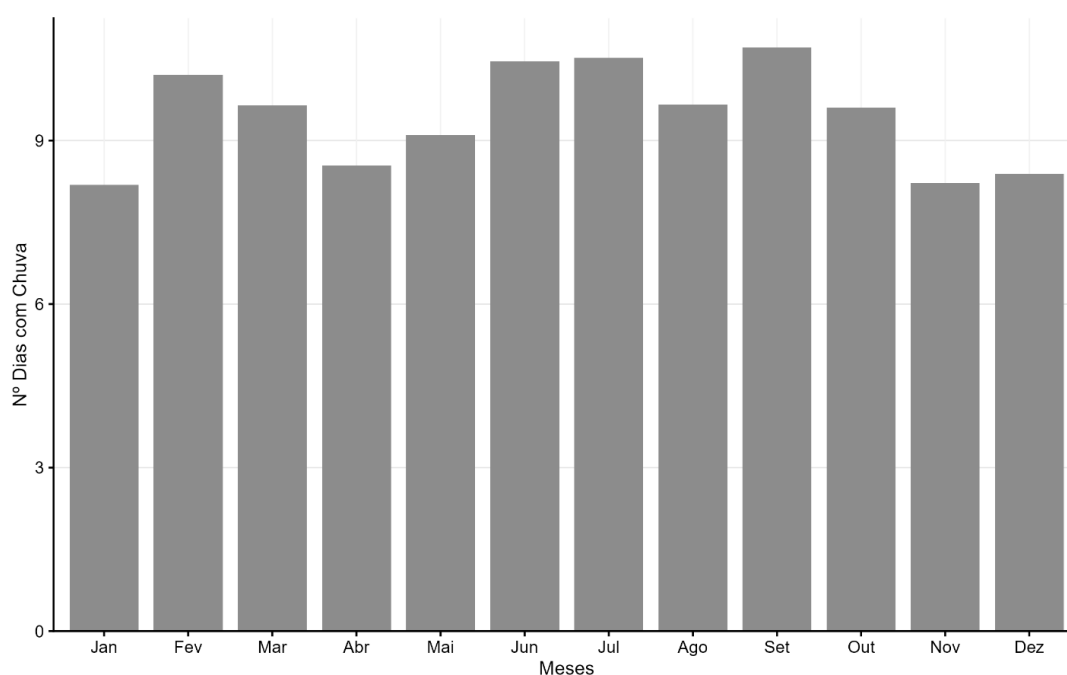
Após o período de maior frequência registrado entre junho e setembro, observa-se

uma redução gradual nos meses de outubro, novembro e dezembro. Outubro apresenta aproximadamente 9,5 dias com chuva, enquanto novembro registra o menor valor do período, próximo de 8,2 dias, seguido por dezembro, com cerca de 8,4 dias.

De modo geral, a distribuição mensal evidencia uma variação relativamente pequena no número de dias com chuva ao longo do ano, com valores situados aproximadamente entre 8 e 11 dias mensais. A maior frequência ocorre no inverno e início da primavera, enquanto os menores valores concentram-se no verão e final da primavera. Esse comportamento reforça a característica de regularidade pluviométrica da região de Bagé, onde a precipitação ocorre de forma distribuída ao longo das diferentes estações.

A análise do número de dias com chuva complementa os resultados apresentados anteriormente para os volumes de precipitação mensal, permitindo distinguir a frequência dos eventos pluviométricos da quantidade total de chuva acumulada. Essa distinção é importante para compreender não apenas quanto chove na região, mas também como essa precipitação se distribui temporalmente ao longo do ano.

Figura 15 – Número médio mensal de dias com chuva em Bagé (1961–2025).



De forma geral, o conjunto das variáveis meteorológicas analisadas evidencia a dinâmica climática característica de Bagé/RS, marcada pela alternância sazonal das condições atmosféricas ao longo do ano. A temperatura do ar apresenta variação bem definida entre os períodos mais quentes e frios, enquanto a precipitação ocorre de maneira relativamente distribuída ao longo dos meses, sem a identificação de uma

estação seca pronunciada.

A análise integrada das temperaturas média, máxima e mínima demonstra a presença de um ciclo térmico anual consistente, associado à variação da radiação solar e à atuação diferenciada dos sistemas atmosféricos. Paralelamente, a umidade relativa do ar apresenta valores elevados durante grande parte do ano, com variações sazonais relacionadas principalmente ao comportamento térmico e à disponibilidade de vapor d'água na atmosfera.

A pressão atmosférica e a insolação também evidenciam padrões sazonais importantes, contribuindo para a compreensão das condições de estabilidade atmosférica e da disponibilidade energética na região. A ocorrência regular de dias com chuva ao longo do ano reforça a característica de distribuição relativamente homogênea da precipitação, ainda que sejam observadas diferenças mensais nos volumes acumulados e na frequência dos eventos.

Assim, os resultados obtidos permitem caracterizar o clima de Bagé como subtropical úmido, com sazonalidade térmica expressiva, precipitação distribuída ao longo do ano e variações sazonais nos demais elementos meteorológicos analisados. Essa caracterização constitui uma base importante para a compreensão das condições atmosféricas regionais e para a análise de processos ambientais e climáticos associados ao município.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO METEOROLÓGICO WRF (2020-2025)

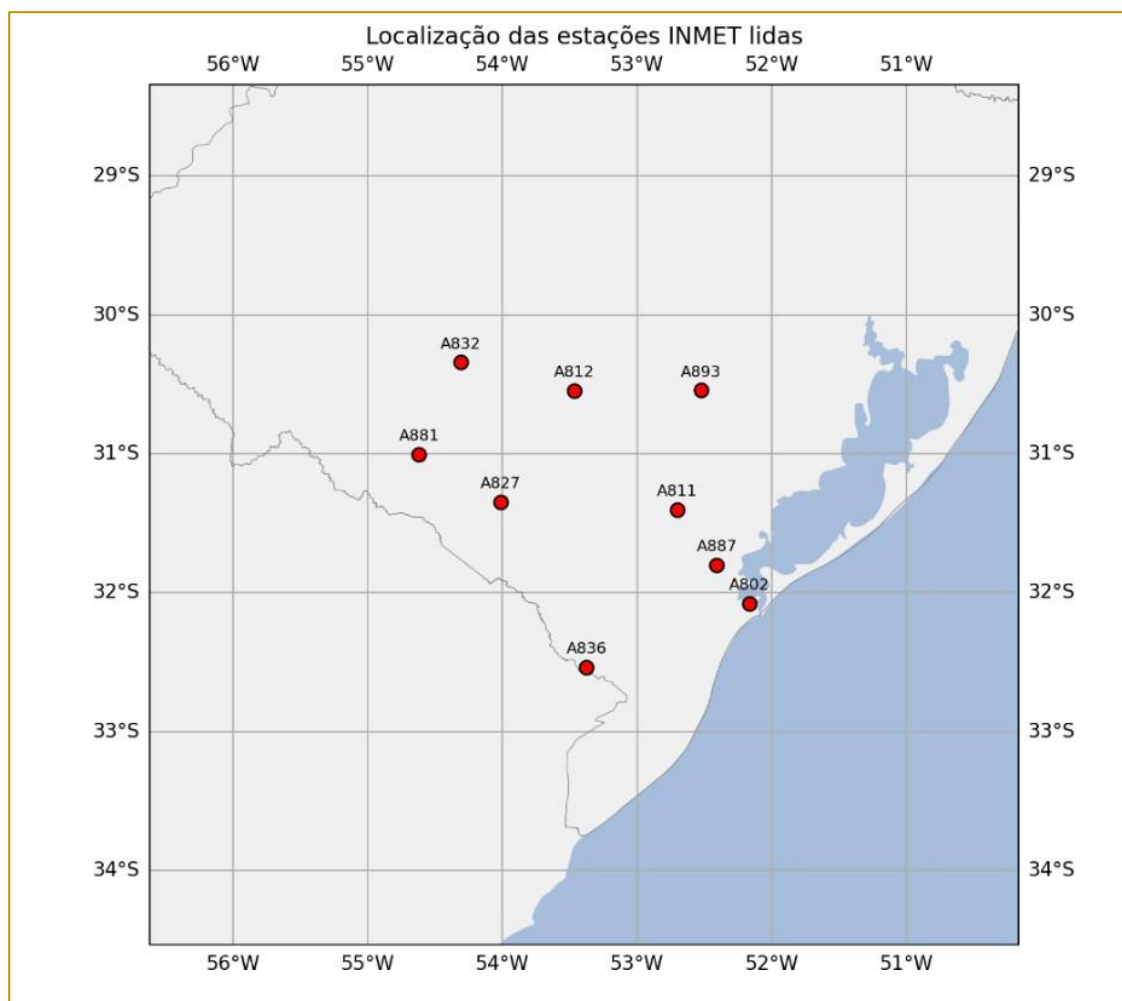
A etapa de validação do modelo meteorológico teve como objetivo avaliar o desempenho do *Weather Research and Forecasting* (WRF) na representação das condições atmosféricas observadas sobre a região sul do Rio Grande do Sul. Para isso, foram utilizados dados observacionais de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), comparados às simulações geradas pelo modelo para o mesmo período e domínio espacial.

A validação constitui uma etapa fundamental para verificar a confiabilidade e a precisão do modelo numérico, permitindo identificar possíveis discrepâncias entre o comportamento simulado e as condições reais observadas. Foram consideradas, neste estudo, as principais variáveis meteorológicas de superfície: temperatura do ar (°C), umidade relativa (%), velocidade e direção do vento (m/s e graus), temperatura do ponto de orvalho (°C), pressão atmosférica (hPa) e precipitação (mm).

As comparações foram realizadas com base em dados provenientes de oito estações meteorológicas representativas da região de estudo, abrangendo diferentes condições topográficas e microclimáticas. As estações utilizadas foram: Caçapava do Sul (A812), Encruzilhada do Sul (A893), Jaguarão (A836), Dom Pedrito (A881), Bagé (A827), Canguçu (A811), São Gabriel (A832) e Capão do Leão – Pelotas (A887).

A Figura 16 apresenta o mapa de localização das estações meteorológicas utilizadas na validação, evidenciando a distribuição espacial dos pontos de observação na região sul do estado. Essa disposição geográfica permite uma avaliação abrangente do desempenho do modelo em diferentes contextos locais, desde áreas de relevo mais elevado até regiões de planície costeira.

Figura 16 – Mapa de localização das estações meteorológicas utilizadas na validação.



A análise dos resultados foi realizada a partir de indicadores estatísticos amplamente utilizados em estudos de validação meteorológica, tais como o *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), Coeficiente de Correlação (r), Coeficiente de

Determinação (R^2) e viés (Bias). Esses índices permitem quantificar o grau de concordância entre as simulações do modelo WRF e os dados observados, avaliando sua capacidade de reproduzir as variáveis meteorológicas com precisão e sem tendências sistemáticas significativas. A seguir, são apresentadas as tabelas com os resultados obtidos para cada variável meteorológica analisada, acompanhadas de uma descrição interpretativa dos principais comportamentos observados nas diferentes estações do INMET. A etapa de validação dos dados meteorológicos teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo numérico *Weather Research and Forecasting* (WRF) na representação das condições atmosféricas observadas sobre a região sul do Rio Grande do Sul. Para isso, foram utilizados dados observacionais de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), comparados às simulações geradas pelo modelo para o mesmo período e domínio espacial.

A análise estatística realizada entre os dados simulados pelo modelo WRF e as observações das estações meteorológicas do INMET indicou um bom desempenho do modelo para a variável de temperatura do ar. De maneira geral, o erro médio quadrático (RMSE) variou entre 2,1 e 2,7 °C, com valores de correlação acima de 0,9 para todas as estações. Esses resultados demonstram que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a variabilidade térmica regional, apresentando ligeira tendência negativa no viés, o que indica uma leve subestimativa das temperaturas simuladas em relação às observadas. As melhores correlações foram observadas em Dom Pedrito e Caçapava do Sul, enquanto Bagé apresentou os maiores desvios. A Tabela 4 apresenta o resumo estatístico para a temperatura do ar.

Tabela 4 – Resultados estatísticos da validação da Temperatura do Ar (°C) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET.

ESTAÇÃO	RMSE	MAE	R^2	CORRELAÇÃO	VIÉS
CAÇAPAVA DO SUL (A812)	2,10	1,55	0,86	0,93	-0,19
ENCRUZILHADA DO SUL (A893)	2,29	1,74	0,81	0,93	-0,53
JAGUARÃO (A836)	2,49	1,98	0,82	0,92	-0,91
DOM PEDRITO (A881)	2,44	1,88	0,86	0,94	-1,00
BAGÉ (A827)	2,71	2,14	0,83	0,93	-1,40
CANGUÇU (A811)	2,11	1,57	0,82	0,93	0,04
SÃO GABRIEL (A832)	2,43	1,85	0,84	0,93	-0,53
CAPÃO DO LEÃO (A887)	2,51	2,02	0,78	0,90	-0,90

Em relação a umidade relativa do ar (Tabela 5), o modelo apresentou desempenho satisfatório, ainda que inferior ao observado para a temperatura. As correlações variaram entre 0,77 e 0,83, com RMSE entre 8 % e 13 %. O modelo tendeu a superestimar a umidade em algumas estações e subestimar em outras, resultando em um viés variável entre -6 % e +3 %. A maior discrepância ocorreu em São Gabriel, possivelmente devido a variações locais não captadas pelo modelo. Abaixo, um resumo dos resultados obtidos para essa variável.

Tabela 5 – Resultados estatísticos da validação da Umidade Relativa do Ar (%) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET.

ESTAÇÃO	RMSE	MAE	R ²	CORRELAÇÃO	VIÉS
CAÇAPAVA DO SUL (A812)	10,93	7,80	0,63	0,81	-2,64
ENCRUZILHADA DO SUL (A893)	11,14	7,90	0,58	0,81	-2,13
JAGUARÃO (A836)	8,80	6,39	0,66	0,83	-1,73
DOM PEDRITO (A881)	10,16	7,67	0,64	0,82	2,81
BAGÉ (A827)	9,94	7,40	0,64	0,83	2,66
CANGUÇU (A811)	10,35	7,37	0,62	0,80	-0,54
SÃO GABRIEL (A832)	12,77	9,36	0,45	0,77	-6,09
CAPÃO DO LEÃO (A887)	9,39	6,81	0,59	0,78	-0,93

A variável velocidade do vento (Tabela 6) apresentou maior dispersão entre as estações, com valores de R² variando entre 0,04 e 0,65. As correlações mais elevadas ocorreram em Capão do Leão e Bagé, refletindo melhor representação das condições de vento nessas áreas. Os valores de RMSE oscilaram de 1,6 m/s a 2,2 m/s, indicando que o modelo tende a apresentar maiores erros em locais com topografia mais complexa ou regime de ventos mais variável. O viés positivo em várias estações mostra uma tendência de superestimativa da velocidade do vento. A Tabela 3 apresenta os resultados estatísticos dessa variável.

Tabela 6 – Resultados estatísticos da validação da Velocidade do Vento (m/s) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET.

ESTAÇÃO	RMSE	MAE	R ²	CORRELAÇÃO	VIÉS
CAÇAPAVA DO SUL (A812)	1,65	1,27	0,05	0,51	0,42
ENCRUZILHADA DO SUL (A893)	2,20	1,83	0,04	0,54	1,64
JAGUARÃO (A836)	1,93	1,56	0,25	0,64	-0,13
DOM PEDRITO (A881)	1,95	1,46	0,56	0,56	0,56
BAGÉ (A827)	1,74	1,32	0,58	0,58	0,29

CANGUÇU (A811)	1,76	1,37	0,50	0,50	0,31
SÃO GABRIEL (A832)	2,20	1,81	0,53	0,53	1,57
CAPÃO DO LEÃO (A887)	1,61	1,25	0,65	0,66	0,60

O ponto de orvalho (Tabela 7) apresentou desempenho consistente com o comportamento da temperatura e da umidade, refletindo a boa capacidade do modelo em reproduzir as condições termodinâmicas da atmosfera. As correlações ficaram acima de 0,9 em todas as estações, e o RMSE oscilou entre 2,0 °C e 2,8 °C. Observou-se leve tendência de subestimativa generalizada, com viés negativo predominante. Esse resultado indica que o modelo reproduziu adequadamente os padrões de umidade e temperatura do ar, fundamentais para análises de conforto térmico e processos de evapotranspiração. A Tabela 4 resume esses resultados.

Tabela 7 – Resultados estatísticos da validação do Ponto de Orvalho (°C) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET.

ESTAÇÃO	RMSE	MAE	R ²	CORRELAÇÃO	VIÉS
CAÇAPAVA DO SUL (A812)	2,25	1,72	0,81	0,92	-1,02
ENCRUZILHADA DO SUL (A893)	2,33	1,85	0,77	0,92	-1,02
JAGUARÃO (A836)	2,45	1,95	0,78	0,92	-1,37
DOM PEDRITO (A881)	2,00	1,53	0,86	0,93	-0,55
BAGÉ (A827)	2,48	1,88	0,81	0,91	-0,95
CANGUÇU (A811)	2,04	1,53	0,84	0,92	-0,13
SÃO GABRIEL (A832)	2,75	2,24	0,73	0,93	-1,97
CAPÃO DO LEÃO (A887)	2,50	1,99	0,76	0,91	-1,26

A pressão atmosférica foi a variável que apresentou o melhor desempenho geral, com valores de correlação próximos de 1,0 e R² de 0,98 em todas as estações. O RMSE manteve-se abaixo de 1 hPa, indicando excelente ajuste entre os dados simulados e observados. Os valores de viés foram baixos e sem tendência sistemática de super ou subestimação. Esses resultados confirmam a robustez do modelo WRF na simulação de variáveis de grande escala, como a pressão. A Tabela 8 apresenta o resumo estatístico dessa variável.

Tabela 8 – Resultados estatísticos da validação da Pressão Atmosférica (hPa) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET.

ESTAÇÃO	RMSE	MAE	R ²	CORRELAÇÃO	VIÉS
CAÇAPAVA DO SUL (A812)	0,40	0,35	0,98	0,98	3,42
ENCRUZILHADA DO SUL (A893)	0,75	0,98	0,98	0,98	2,06
JAGUARÃO (A836)	0,96	0,96	0,98	0,98	0,16
DOM PEDRITO (A881)	0,94	0,94	0,98	0,98	0,84
BAGÉ (A827)	0,82	0,82	0,98	0,98	1,96
CANGUÇU (A811)	0,03	0,03	0,98	0,98	4,55
SÃO GABRIEL (A832)	0,97	0,97	0,98	0,98	2,15
CAPÃO DO LEÃO (A887)	0,95	0,95	0,98	0,98	-0,23

A precipitação (Tabela 9) foi a variável que apresentou os maiores erros relativos, refletindo a complexidade dos processos físicos envolvidos e as limitações inerentes à representação da convecção em modelos numéricos. O RMSE variou entre 2 mm e 4,6 mm, com correlações modestas, geralmente inferiores a 0,4. Mesmo assim, o modelo foi capaz de representar a ocorrência e distribuição geral das chuvas, ainda que com discrepâncias na intensidade. Os maiores erros ocorreram em São Gabriel e Bagé, enquanto Encruzilhada do Sul apresentou o melhor ajuste.

Tabela 9 – Resultados estatísticos da validação da Precipitação (mm) entre o modelo WRF e as estações meteorológicas do INMET.

ESTAÇÃO	RMSE	MAE	R²	CORRELAÇÃO	VIÉS
CAÇAPAVA DO SUL (A812)	3,42	2,01	0,45	0,45	4,05
ENCRUZILHADA DO SUL (A893)	2,03	1,43	0,30	0,30	2,50
JAGUARÃO (A836)	3,26	1,96	0,35	0,35	3,25
DOM PEDRITO (A881)	3,34	1,82	0,36	0,36	3,34
BAGÉ (A827)	4,02	2,01	0,39	0,39	2,94
CANGUÇU (A811)	2,85	1,68	0,41	0,41	2,85
SÃO GABRIEL (A832)	4,60	0,76	0,17	0,17	4,60
CAPÃO DO LEÃO (A887)	3,19	1,67	0,38	0,38	3,19

5 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA (2020-2024)

A caracterização das condições meteorológicas foi realizada com base nas médias mensais e sazonais observadas na estação do empreendimento localizada em Candiota-RS, no período de 2020 a 2024. As variáveis analisadas incluíram pressão atmosférica, radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa e precipitação pluviométrica. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 17 a 26, correspondentes às variações mensais e sazonais de cada parâmetro.

A pressão atmosférica média mensal (Figura 17) variou entre aproximadamente 962 e 977 mbar. Os maiores valores ocorreram no mês de julho, correspondendo ao inverno, período em que predominam sistemas de alta pressão e massas de ar mais estáveis. Os menores valores foram observados em agosto e novembro, meses marcados por maior instabilidade e passagem de frentes frias. De forma sazonal (Figura 18), o outono apresentou a maior pressão média, seguido do verão, enquanto a primavera registrou as menores médias, refletindo a transição entre diferentes sistemas atmosféricos.

Figura 17 – Variação mensal da pressão atmosférica média (2020–2024).

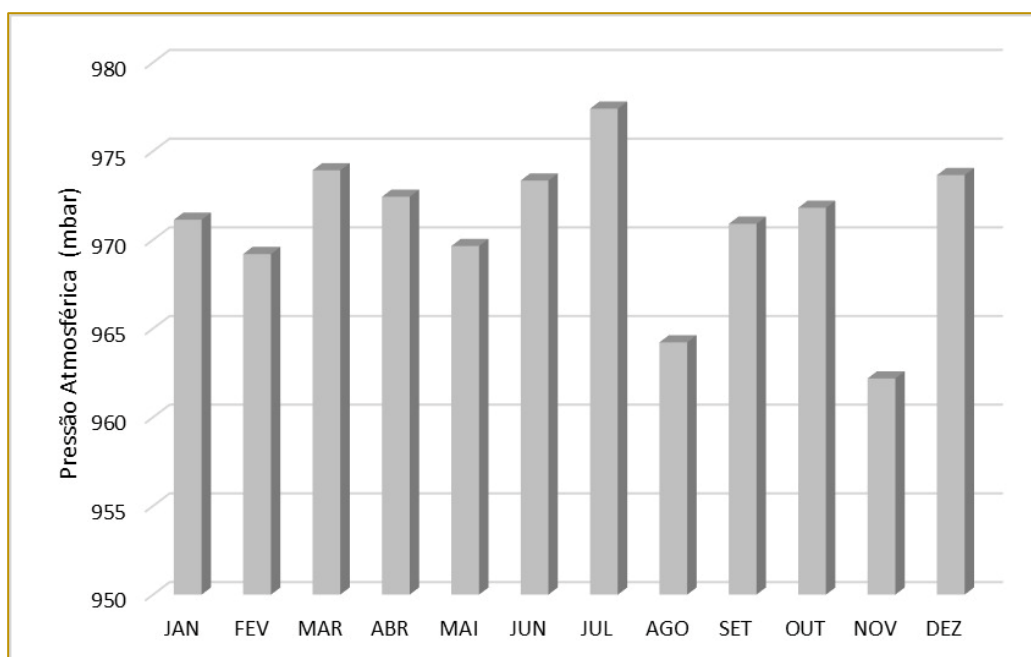
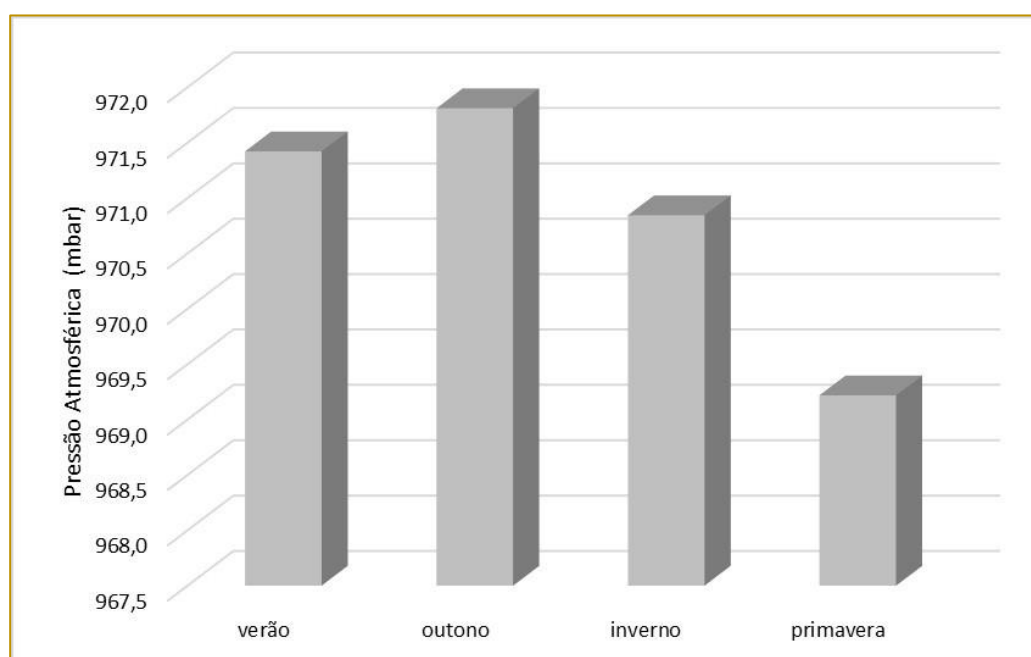


Figura 18- Variação sazonal da pressão atmosférica média (2020–2024)



A radiação solar global (Figura 19) apresentou comportamento típico da região subtropical, com valores mais elevados durante o verão e redução acentuada no inverno. As médias mensais variaram entre cerca de 120 W/m² em junho e 340 W/m² em janeiro, acompanhando o aumento da duração do dia e do ângulo solar. Em termos sazonais (Figura 20), o verão apresentou a maior média de radiação, seguido da primavera, enquanto o

inverno apresentou os menores valores, refletindo a influência direta da insolação sobre o balanço de energia da superfície.

Figura 19 – Variação mensal da radiação solar global média (2020–2024).

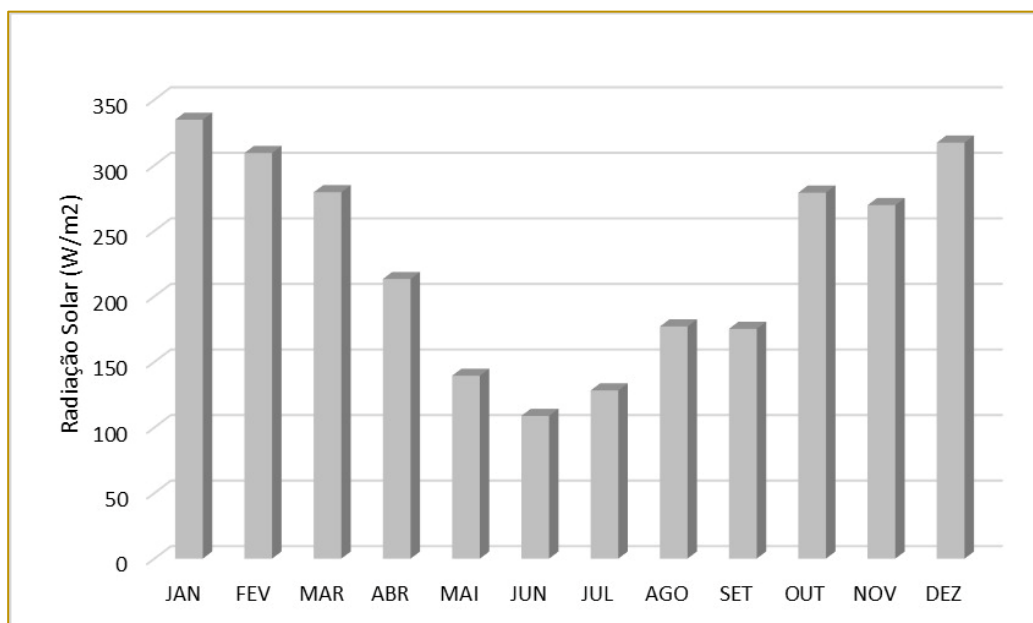
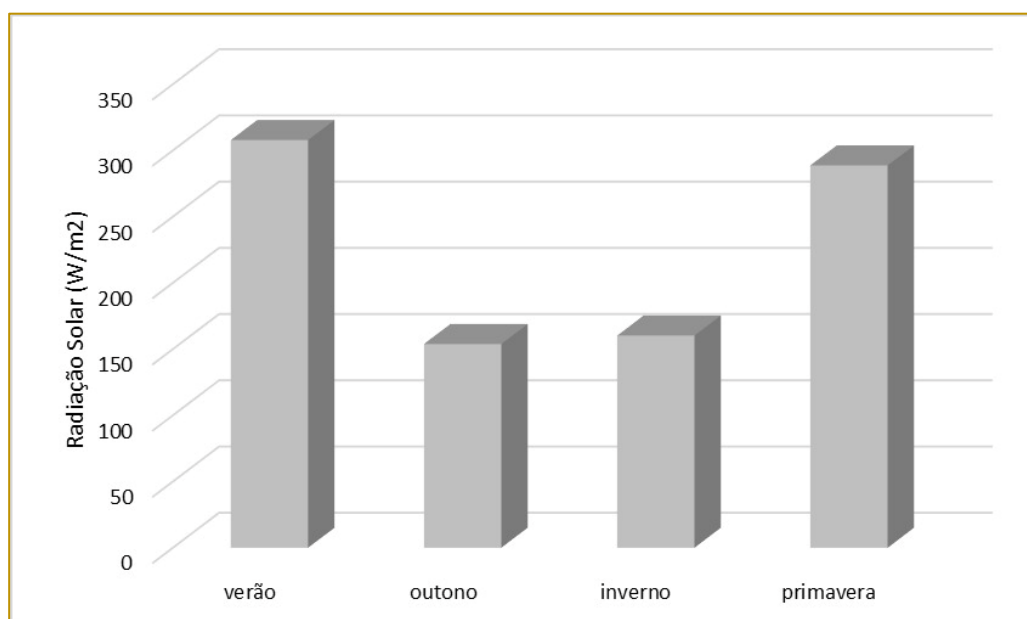


Figura 20 – Variação sazonal da radiação solar global média (2020–2024).



A temperatura média do ar (Figura 21) apresentou padrão sazonal bem definido, com os valores mais elevados entre dezembro e fevereiro e os menores entre junho e julho. As médias mensais variaram de aproximadamente 13°C a 24°C, indicando uma amplitude térmica anual significativa. Sazonalmente (Figura 22), o verão apresentou médias entre 24 e 25°C, o outono entre 17 e 18°C, o inverno entre 15 e 16°C e a primavera cerca de 21°C.

Esse comportamento confirma a predominância de verões quentes e invernos frios, característicos do clima subtropical úmido do sul do Brasil.

Figura 21 – Variação mensal da temperatura média do ar (2020–2024).

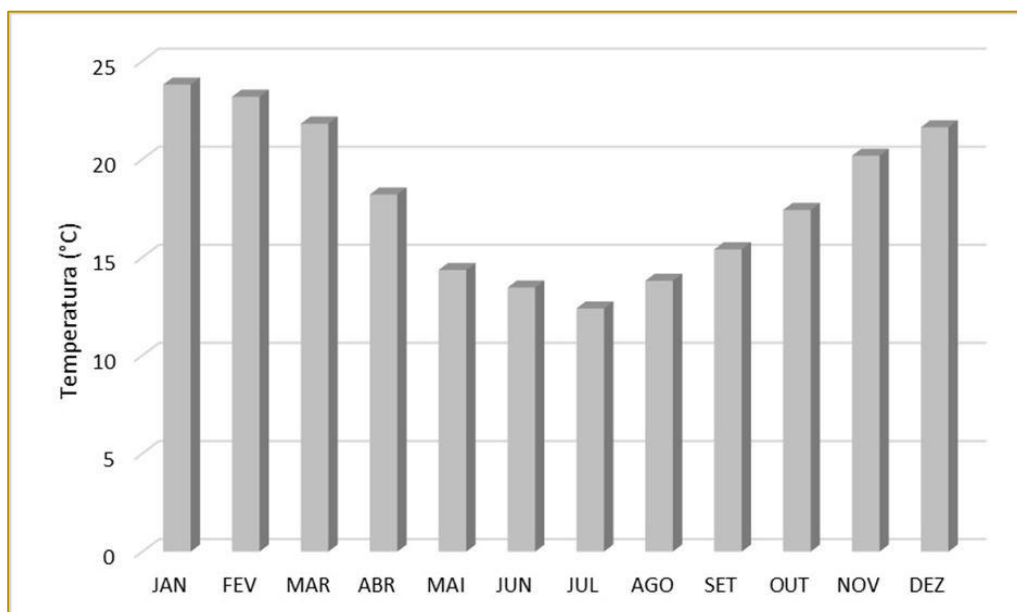
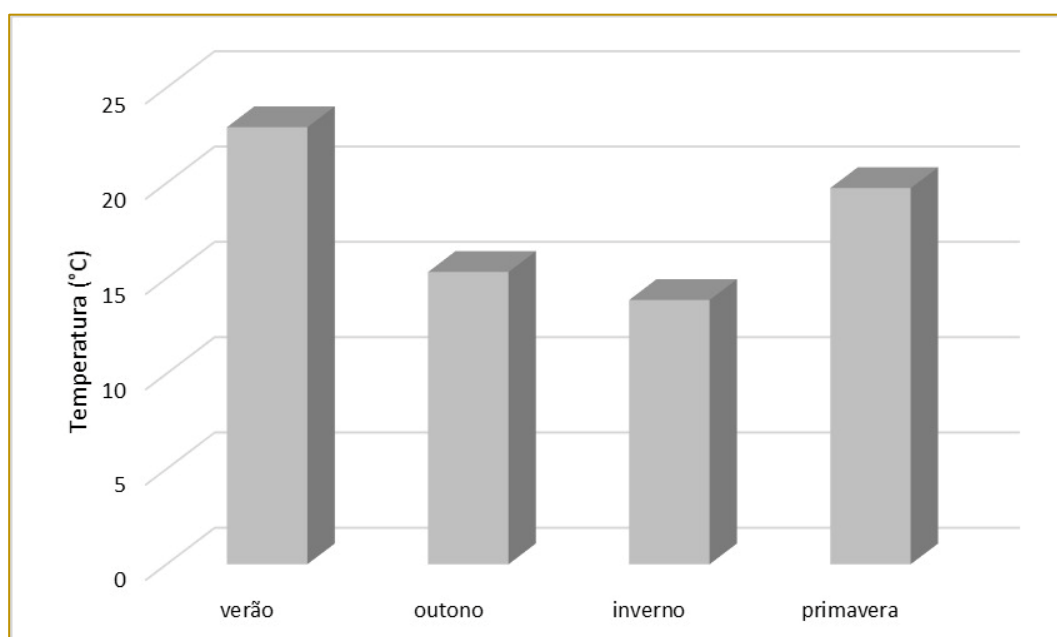


Figura 22 – Variação sazonal da temperatura média do ar (2020–2024).



A umidade relativa do ar (Figura 23) apresentou comportamento inverso ao da temperatura e da radiação solar, com valores mais elevados nos meses frios e menores nos meses quentes. As médias mensais oscilaram entre 72% e 87%, com máximos observados entre junho e agosto e mínimos entre dezembro e janeiro. Na análise sazonal (Figura 24), o outono e o inverno apresentaram as maiores médias, próximas de 86 a 87%, enquanto o

verão e a primavera registraram valores inferiores, próximos de 77% a 78%. Esse padrão evidencia a influência das menores temperaturas e da maior estabilidade atmosférica sobre a elevação da umidade relativa.

Figura 23 – Variação mensal da umidade relativa média (2020–2024).

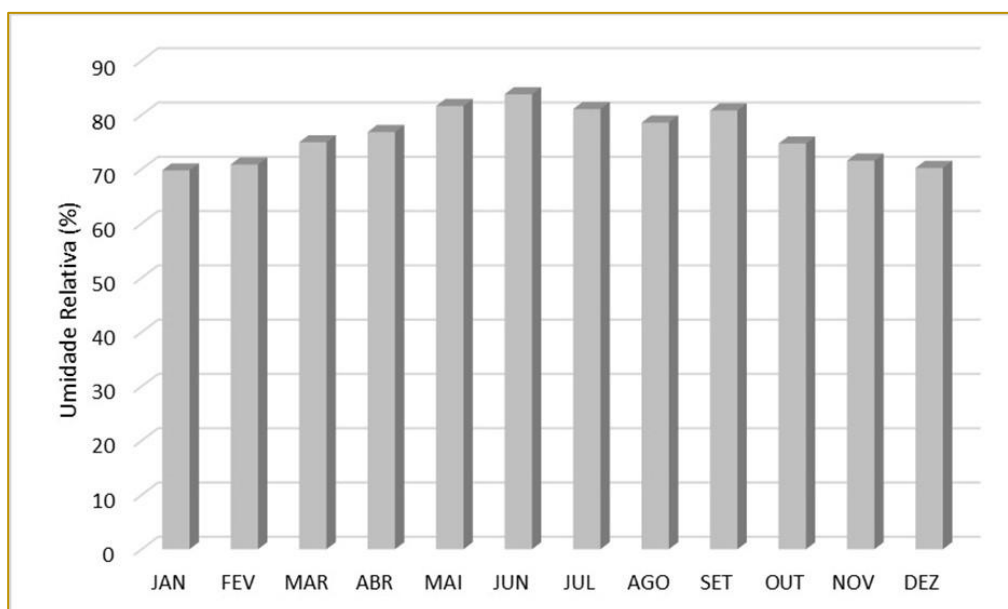
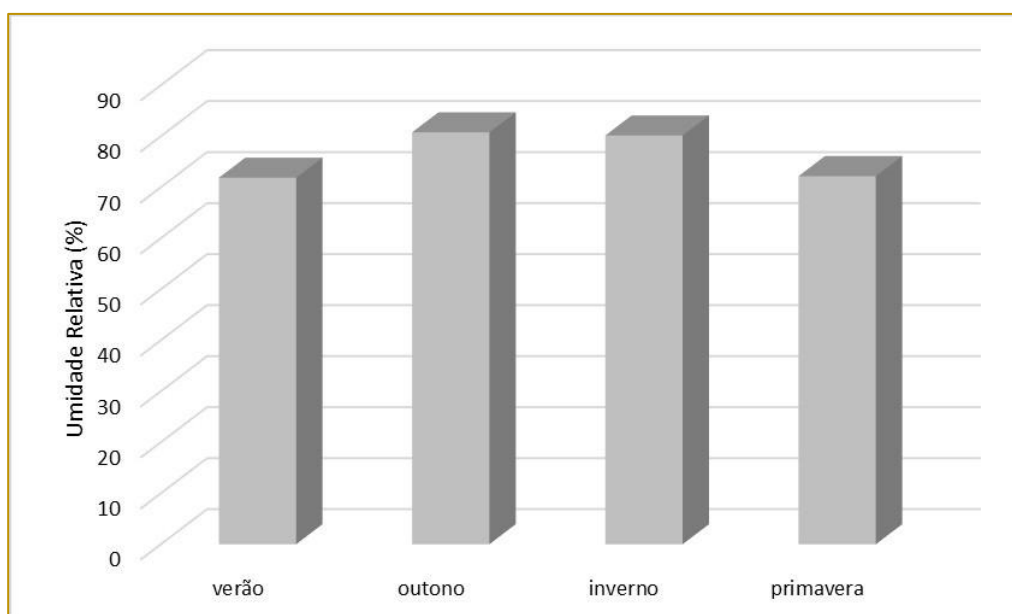


Figura 24 – Variação sazonal da umidade relativa média (2020–2024).



A precipitação pluviométrica apresentou médias mensais entre 0,3 e 0,9 mm, com pico no mês de janeiro e valores mínimos em abril e agosto. Embora as chuvas ocorram ao longo de todo o ano, observa-se leve concentração durante o verão e o outono, coerente com o regime subtropical úmido da região. Em termos sazonais, o outono apresentou a maior

média de precipitação, seguido da primavera e do verão, enquanto o inverno foi o período mais seco.

Figura 25 – Variação mensal da precipitação média (2020–2024).

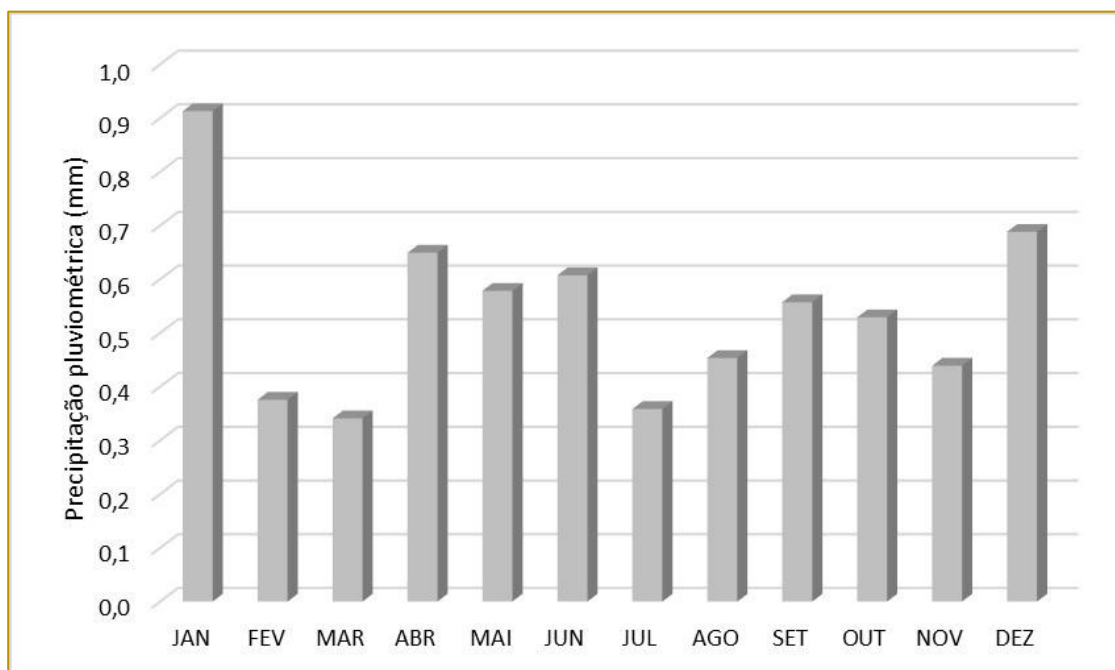
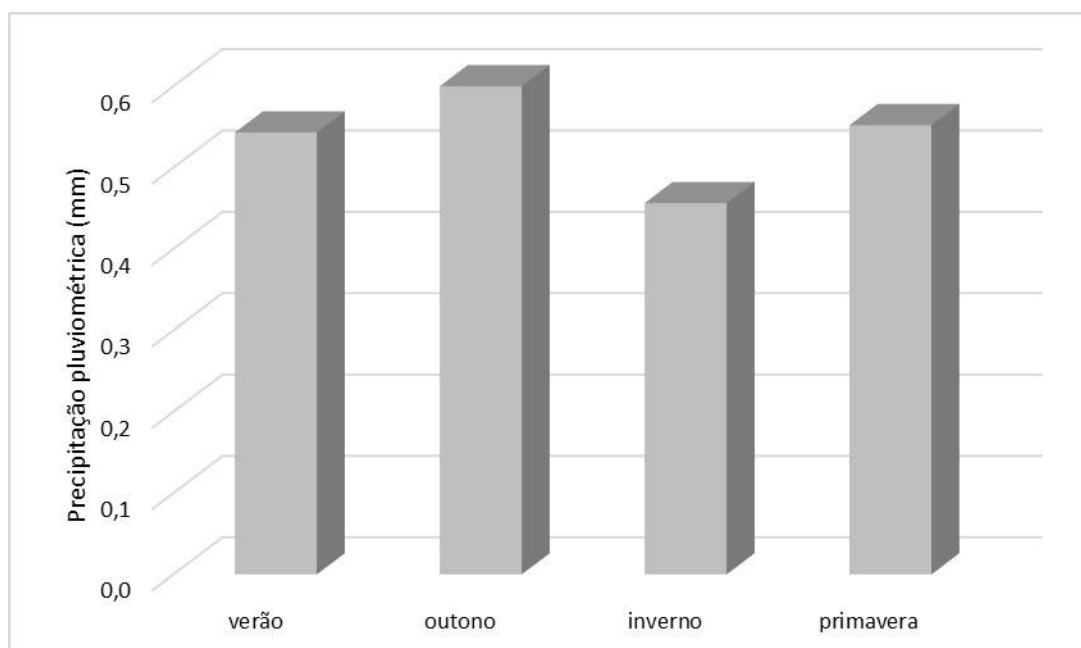


Figura 26 – Variação sazonal da precipitação média (2020–2024) em fator 1000 (0,6 mm equivale a 600).



De modo geral, o período analisado reflete as características típicas do clima subtropical úmido de Candiota-RS, com verões quentes e de elevada radiação solar, invernos frios e úmidos e estações de transição marcadas por grande variabilidade térmica e atmosférica. A distribuição pluviométrica mostrou-se relativamente homogênea ao longo

do ano, com leve predominância das chuvas nos meses quentes, enquanto a pressão atmosférica e a umidade relativa tendem a se elevar durante o inverno, quando há maior estabilidade e menor aquecimento solar. Esses resultados evidenciam o comportamento climático esperado para a região, coerente com sua localização geográfica e influência dos sistemas meteorológicos atuantes no sul do Brasil.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o descrito nesse relatório, o comportamento climático de Candiota exerce papel determinante na dinâmica atmosférica local, influenciando diretamente os processos de dispersão, transporte e concentração de poluentes ao longo do ano. As variações sazonais na intensidade dos ventos, na umidade, na temperatura, na radiação solar e na estabilidade atmosférica resultam em diferentes condições de mistura vertical e de circulação do ar, que podem favorecer tanto a dispersão eficiente dos poluentes quanto o seu acúmulo nas camadas mais próximas à superfície. Nos períodos mais quentes e instáveis, a maior turbulência atmosférica contribui para uma dispersão mais efetiva, enquanto nos meses frios e estáveis predominam condições que limitam o transporte vertical e horizontal, favorecendo a concentração de material particulado e gases associados às emissões industriais e à geração de energia. Nesse contexto, a integração entre os dados meteorológicos, o monitoramento ambiental e os modelos de qualidade do ar são essenciais para compreender a variabilidade temporal e espacial da poluição, subsidiar ações de controle e mitigação e orientar estratégias de gestão voltadas à proteção da saúde pública e à sustentabilidade ambiental da região.

7 REFERÊNCIAS

Brandt, J. et al. Assessment of Health-Cost Externalities of Air Pollution at the National Level using the EVA Model System. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 7725–7746, 2013.

Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, p. 88–108, 2004.

Finlayson-Pitts, B. J.; Pitts, J. N. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments and Applications*. Academic Press, San Diego, 2000.

Grimm, A. M.; Ferraz, S. E. T.; Gomes, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v. 11, p. 2863–2880,

1998.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: nov. 2025.

Jacobson, M. Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling. 2. ed. Cambridge University Press, 2005.

Lima, R. F. de et al. Climate change assessment in Brazil: Utilizing the Köppen-Geiger (1936) climate classification. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 38, p. e38230001, 2023.

Marengo, J. A.; Soares, W. R.; Saulo, C.; Nicolini, M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. Journal of Climate, v. 17, p. 2261–2280, 2004.

Reboita, M. S.; Krüger, L. F.; Ambrizzi, T.; Rocha, R. P. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3. ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 2016.

Vera, C. et al. The South American Low-Level Jet Experiment (SALLJEX): Overview and preliminary results. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 87, p. 63–77, 2006.