



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



EMERSON RIBEIRO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO VENTO À SUPERFÍCIE NO NORDESTE DO BRASIL**

MACEIÓ – AL  
ABRIL – 2024

EMERSON RIBEIRO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO VENTO À SUPERFÍCIE NO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para o grau de mestre em meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Daniel dos S. Silva  
Coorientador: Profa. Dr<sup>a</sup>. Rafaela Lisboa Costa

MACEIÓ – AL

ABRIL – 2024

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 - 661

- O48a Oliveira, Emerson Ribeiro de.  
Análise estatística do vento à superfície no Nordeste do Brasil / Emerson Ribeiro de Oliveira. – 2024.  
55 f.: il.
- Orientador: Fabricio Daniel dos S. Silva.  
Coorientadora: Rafaela Lisboa Costa.  
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 44-55.
1. Brasil, Nordeste – Ventos. 2. Climatologia. 3. Regiões homogêneas. 4. Previsão. 5. Análise de tendências. I. Título.

CDU: 551.5(812/813)



## ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos trinta dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e quatro, às nove horas, por Videoconferência, Campus A. C. Simões da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), perante a Banca Examinadora composta pelo Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva – Orientador, Profa. Dra. Rafaela Lisboa Costa – Coorientadora, Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes - Membro Interno e Prof. Dr. Jorio Bezerra Cabral Júnior - Membro Externo, o senhor **Emerson Ribeiro de Oliveira** sob a orientação do Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva–, apresentou publicamente uma dissertação intitulada: “ANÁLISE ESTATÍSTICA DO VENTO À SUPERFÍCIE NO NORDESTE DO BRASIL.” número de série, **MET-UFAL-MS-203** como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Meteorologia, área de concentração: Processos de Superfície Terrestre. Após a apresentação, e, seguindo o regimento do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFAL no seu Artigo 19, a Banca Examinadora considerou o senhor **Emerson Ribeiro de Oliveira** aprovado. Ainda de acordo com o parágrafo único do Artigo 19, o Diploma de Mestre em Meteorologia - área de concentração Processos de Superfície Terrestre será expedido a requerimento do concluinte, anexado a no mínimo 07 (sete) cópias da versão definitiva da dissertação, satisfeitas as modificações indicadas pelos relatores e Banca Examinadora. Eu, Helber Barros Gomes, Coordenador do Curso de Mestrado em Meteorologia da UFAL, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos componentes da Banca Examinadora.

Maceió, 30 de abril de 2024.

Prof. Dr. Helber Barros Gomes  
(Coordenador)

Documento assinado digitalmente  
 **HELBER BARROS GOMES**  
Data: 30/04/2024 19:03:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva  
(Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **FABRICIO DANIEL DOS SANTOS SILVA**  
Data: 30/04/2024 14:33:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Rafaela Lisboa Costa  
(Coorientadora)

Documento assinado digitalmente  
 **RAFAELA LISBOA COSTA**  
Data: 30/04/2024 14:20:10-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes  
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente  
 **HELIOFABIO BARROS GOMES**  
Data: 30/04/2024 16:48:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorio Bezerra Cabral Júnior  
(Membro Externo)

Documento assinado digitalmente  
 **JORIO BEZERRA CABRAL JUNIOR**  
Data: 30/04/2024 16:21:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

## RESUMO

A região Nordeste do Brasil (NEB) se destaca no cenário nacional de produção de energia eólica, com 523 parques eólicos instalados de um total de 619 no Brasil. Com ventos favoráveis para a produção de energia eólica principalmente no segundo semestre do ano, ainda há espaço para a prospecção e ampliação de parques eólicos, haja visto que ainda há estados com poucos ou nenhum parque eólico instalado, como é o caso de Alagoas. Para otimizar a escolha dos melhores locais para instalação/ampliação de parques eólicos, dados relacionados ao vento, como direção predominante e velocidades em diferentes alturas são cada vez mais necessários, demandando medidas e estimativas o mais acuradas possíveis dessa variável atmosférica. Nesse sentido, utilizamos nesse trabalho dados de velocidade do vento próximo a superfície da última versão de uma análise gradeada de alta resolução espacial ( $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ) em escala diária, disponibilizada por Xavier et al. (2022) desde 1961 até 2020. A climatologia gerada nessa alta resolução espacial mostrou que há um gradiente Leste-Oeste de intensidades que se amplifica no sentido Nordeste-Sudoeste do NEB entre janeiro e dezembro com destaque para o período julho-dezembro quando se observa as maiores intensidades médias diárias de velocidade. O Norte do Maranhão e do Piauí, Ceará com exceção do seu extremo sul, e grandes áreas do Rio Grande do Norte e demais estados do leste do NEB se destacam com velocidades médias diárias que ultrapassam os 3m/s, além de localidades no interior de Pernambuco e Bahia. Há uma grande área de ventos pouco intensos em todo o ano que engloba o centro-sul dos estados do Maranhão e Piauí ao oeste da Bahia. Diante desse cenário climático, esse estudo também identificou por meio da aplicação de uma técnica estatística multivariada, a Análise de Agrupamento (AA), seis regiões ou grupos eólicos homogêneos no NEB: G1 a G6, seguindo uma ordem decrescente de intensidade, as quais foram delimitadas pelos limites dos municípios que os compõem. O G1, por exemplo, é o grupo com velocidades mais intensas e constantes durante todo o ano e se localiza basicamente entre os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, enquanto o G6 agrupa municípios do centro-sul maranhense, oeste piauiense e oeste baiano com as menores intensidades de vento. Esses resultados iniciais servirão de base para estudos e projetos complementares para ampliação da geração de energia elétrica de fonte eólica no NEB. A análise de tendências foi investigada com o teste não paramétrico de Mann-Kendall, mostrando que há sistematicamente uma diminuição nas velocidades do vento principalmente a partir do início dos anos 2000, cujas quebras estruturais foram identificadas pelo teste de Pettitt, indicando que esse padrão de diminuição na velocidade média anual dos ventos é significativo e constante no final das séries temporais, principalmente na segunda metade do período entre 1991 a 2020.

**Palavras-chave:** vento, climatologia, regiões homogêneas, tendências, previsão.

## ABSTRACT

The Northeast region of Brazil (NEB) stands out in the national wind energy production scenario, with 523 wind farms installed out of a total of 619 in Brazil. With winds developed for the production of wind energy mainly in the second half of the year, there is still room for prospecting and expanding wind farms, it should be noted that there are still states with few or no wind farms installed, as is the case of Alagoas. To optimize the choice of the best locations for installing/expanding wind farms, data related to wind, such as predominant direction and speeds at different heights, are increasingly necessary, requiring the most accurate measurements and estimates of this atmospheric variable possible. In this sense, in this work we used wind speed data near the surface from the latest version of a gridded analysis of high spatial resolution ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ) on a daily scale, made available by Xavier et al. (2022) from 1961 to 2020. The climatology generated at this high spatial resolution showed that there is an East-West gradient of intensities that amplifies in the Northeast-Southwest direction of the NEB between January and December, with emphasis on the July-December period when it is observed the daily average speed intensities are higher. The north of Maranhão and Piauí, Ceará, with the exception of its extreme south, and large areas of Rio Grande do Norte and other states in the east of the NEB stand out with average daily speeds that exceed 3m/s, in addition to locations in the interior of Pernambuco and Bahia. There is a large area of low-intensity winds throughout the year that encompasses the center-south of the states of Maranhão and Piauí to the west of Bahia. Given this climate scenario, this study is also organized through the application of a multivariate statistical technique, Cluster Analysis (AA), six homogeneous wind regions or groups in the NEB: G1 to G6, following a decreasing order of intensity, which they were delimited by the limits of the municipalities that compose them. G1, for example, is the group with the most intense and constant speeds throughout the year and is located mainly between the states of Rio Grande do Norte and Paraíba, while G6 groups municipalities in the center-south of Maranhão, west of Piauí and west of Bahia. with the lowest wind intensities. These initial results will serve as the basis for complementary studies and projects to expand the generation of electrical energy from wind sources in the NEB. A trend analysis was investigated with the non-parametric Mann-Kendall test, showing that there is a systematic decrease in wind speeds mainly from the beginning of the 2000s, whose structural breaks were identified by the Pettitt test, since this pattern of The increase in average annual wind speed is significant and constant at the end of the time series, especially in the second half of the period between 1991 and 2020.

**Keywords:** wind, climatology, homogeneous regions, trends, forecast.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Modelo tricelular de circulação geral da atmosfera. Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica.....	14
<b>Figura 2.</b> Mapa de localização do NEB com a delimitação dos estados (Siglas) e da região do semiárido (contorno azul).....	18
<b>Figura 3.</b> À esquerda, distribuição espacial das 96 estações meteorológicas convencionais do INMET no NEB. À direita, pontos extraídos da análise gradeada de Xavier para cada município (pontos pretos).....	20
<b>Figura 4.</b> Climatologia mensal da velocidade do vento (m/s) no NEB. Período: 1961-2020..	25
<b>Figura 5.</b> Climatologia da velocidade do vento (m/s) no NEB no primeiro semestre (S1), à esquerda; e no segundo semestre do ano (S2), no centro, respectiva diferença entre S2 e S1, à direita. Período: 1961-2020 .....	25
<b>Figura 6.</b> Climatologia da velocidade do vento (m/s) no primeiro semestre do NEB, à esquerda para 1961-1990; no centro para 1991-2020, e respectiva diferença entre 1990-2020 e 1961-1990 .....	26
<b>Figura 7.</b> Climatologia da velocidade do vento (m/s) no segundo semestre do NEB, à esquerda para 1961-1990; no centro para 1991-2020, e respectiva diferença entre 1990-2020 e 1961-1990 .....	27
<b>Figura 8.</b> Climatologia da velocidade média anual do vento (m/s) do NEB, à esquerda para 1961-1990; no centro para 1991-2020, e respectiva diferença entre 1990-2020 e 1961-1990.. .....	27
<b>Figura 9.</b> Análise de agrupamento para seis áreas: (a) Distribuição espacial de cada grupo homogêneo (G), G1 com municípios destacados em amarelo, G2 com municípios destacados em vermelho, G3 com municípios destacados em verde, G4 com municípios destacados em azul escuro, G5 com municípios destacados em azul claro e G6 com municípios destacados em rosa; (b) dendograma dos grupos e (c) grupos selecionados em seis diferentes níveis.....	28
<b>Figura 10.</b> Velocidade média mensal do vento obtida do conjunto de elementos para cada grupo homogêneo no NEB, (a) mensal e (b) sazonal. ....	30
<b>Figura 11.</b> No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G1. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.....	32

<b>Figura 12.</b> No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G2. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.....	33
<b>Figura 13.</b> No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G3. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.....	33
<b>Figura 14.</b> No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G4. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.....	34
<b>Figura 15.</b> No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G5. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.....	35
<b>Figura 16.</b> No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G6. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.....	35
<b>Figura 17.</b> Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G1, no período 1961-2020. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de $\pm 2,5$ desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.....	37
<b>Figura 18.</b> Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G1, no período 1961-2020. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de $\pm 2,5$ desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.....	38
<b>Figura 19.</b> Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G1, no período 1961-2020. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de $\pm 2,5$ desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.....	38

**Figura 20.** Teste de Pettittt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G1, no período 1961-2020. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste..... 39

**Figura 21.** Teste de Pettittt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G1, no período 1961-2020. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.....40

**Figura 22.** Teste de Pettittt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G1, no período 1961-2020. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste..... 40

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Frequência absoluta e relativa do número de municípios pertencentes às sub-regiões homogêneas determinadas segundo a velocidade média mensal do vento no NEB.....	9
<b>Tabela 2.</b> Estatísticas descritivas da velocidade do vento (m/s) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1961-2020.....	30
<b>Tabela 3.</b> Estatísticas descritivas da velocidade do vento (m/s) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1961-1990.....	30
<b>Tabela 4.</b> Estatísticas descritivas da velocidade do vento (m/s) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1991-2020.....	31
<b>Tabela 5.</b> Características e resultados do teste de Mann-Kendall nos três períodos climáticos analisados, para as seis regiões homogêneas de velocidade do vento do NEB.....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS

GW/h – Giga Watts por hora

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

MW- Mega Watts

GWEC - Global Wind Energy Council

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

NEB – Nordeste do Brasil

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

CGA – Circulação Geral da Atmosfera

OMM – Organização Meteorológica Mundial

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

ENOS – El Niño Oscilação Sul

ET - Evapotranspiração

ADW - Angular Distance Weighting

IDW - Inverse Distance Weighting

GMTED - Global Multiresolution Terrain Elevation Data

MCG – Modelos de Circulação Geral

RMSE – Root Mean Squared Error

MAE – Mean Absolute Error

MK – Mann-Kendall

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	13
2.1 Geral.....	13
2.2 Específicos .....	13
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
3.1 Circulação geral da atmosfera (CGA).....	14
3.2 Variabilidade do vento no Nordeste .....	15
3.3 Influencia da TSM no clima do Nordeste .....	16
<b>4. MATERIAL E METODOS</b> .....	18
4.1 Área de estudo .....	18
4.2 Dados observados de vento no NEB.....	19
4.3 Identificação de Regiões Homogêneas Via Análise de Agrupamento .....	20
4.4 Análise de Tendências de Séries Temporais.....	21
4.4.1 Teste Não-Paramétrico de Mann-Kendall (MK) .....	12
4.4.2 Teste de Pettitt .....	23
<b>5. RESULTADOS</b> .....	24
5.1 Climatologia da Velocidade do Vento no Período 1961-2020 .....	24
5.2 Identificação de Áreas Homogêneas de Velocidade do Vento.....	27
5.3 Análise de Tendência da Velocidade do Vento no NEB de 1961 a 2020 .....	30
5.4 Análise Estrutural das Séries Temporais Usando o Teste de Pettitt .....	36
<b>6. DISCUSSÃO</b> .....	41
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	43
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna avança em tecnologia, produção de alimentos, industrialização, para citar alguns fatores que impulsionam a economia global. No entanto, para tudo isso é preciso energia, cuja produção ainda é um dos principais desafios da humanidade que ainda persiste na dependência de recursos naturais não renováveis, tendo no petróleo sua principal fonte de matéria prima (Silva et al., 2002; Liu et al., 2022). Ao persistir a atual taxa de consumo, as reservas mundiais poderão se esgotar dentro de algumas décadas.

No atual contexto de desenvolvimento sustentável, a humanidade busca fontes alternativas de energia, sendo a energia eólica uma destas fontes (Adami et al., 2017). Portanto, é necessário aprimorar os estudos relacionados ao vento e a geração de energia, pois essa é cada vez mais uma alternativa para expandir a geração renovável de energia. Em um País de grande extensão territorial como o Brasil, esse recurso tem crescido em utilização para atender as demandas de eletricidade da população, com uma produção de aproximadamente 4,66 GW/h em 2019 de acordo com o Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS, 2020).

A energia eólica é "limpa" e de baixo custo, quando comparada com outras fontes de energia renováveis, como a solar, por exemplo (Lakatos et al., 2011). Quanto à relevância do seu caráter não poluente, considere-se que a geração de 1.649 GW/h de energia extraída dos ventos, em substituição a outras fontes convencionais, evitaria o lançamento de  $1,3 \times 10^6$  de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre, o que representaria contribuição de grande importância para o ambiente global (Garcia et al., 1998; Silva et al., 2004).

Incentivos governamentais e não governamentais são responsáveis pela expansão da produção de energia de natureza eólica em todo o mundo, que apresentou uma capacidade instalada de 486.749 Megawatts (MW) no final de 2016 (GWEC, 2017). Dados mais atuais mostram que o Brasil vem quebrando recordes ano a ano em sua produção, com um incremento de 4 GW em 2022, colocando o Brasil na terceira colocação mundial em capacidade instalada *onshore* (termo usado para a geração de energia eólica sobre a superfície continental), ficando atrás apenas da China e Estados Unidos (GWEC 2023).

Embora a maior produção seja das hidroelétricas, o fornecimento da energia eólica tem sido ampliado e representa atualmente 11.4% da matriz energética brasileira, com previsão de capacidade instalada de 16 GW ao final do período 2023-2017 (RAÍZEN, 2022). O Brasil possui registros de velocidade do vento três vezes superior à necessidade elétrica do país,

colocando-o em posição de destaque no cenário mundial. Atualmente são 496 usinas eólicas instaladas com capacidade superior a 10 GW. Números de 2017 mostram que a região Nordeste (NEB) abriga o maior potencial eólico do país, estando o maior potencial no estado do Rio Grande do Norte com 920 MW instalada, acompanhado do Ceará com 600 MW e da Bahia com 520 MW (ABEEÓLICA, 2017; GWEC, 2017).

No NEB, as condições favoráveis do vento levaram a geração de energia eólica a bater recordes nos últimos anos (NEOENERGIA 2023), com 523 de um total de 619 parques eólicos instalados no país. Essa produção além de tudo, é estratégica, haja visto que a maior parte dos reservatórios para produção de energia hidrelétrica perdem capacidade no segundo semestre do ano após a redução natural das chuvas nas regiões centro-oeste e sudeste, período que coincide com a maior intensidade dos ventos no NEB.

Diante da capacidade de geração de energia eólica do país pesquisadores têm explorado o NEB com a finalidade de obter informações sobre o comportamento do vento local e assim poder contribuir em estudos que viabiliza a configuração e instalações de parques eólicos na região (Lira et al., 2017; do Nascimento et al., 2016; Carneiro e Carvalho, 2015; Araújo et al., 2016; Santana et al., 2015; de Oliveira et al., 2012; Oliveira e Costa, 2011; Silva et al., 2004; Silva et al., 2002).

Todas essas questões que envolvem a produção de energia eólica no Brasil, por vezes, desvia o foco da principal variável meteorológica que mantém essa máquina econômica funcionando, que é o próprio vento, que também apresenta uma sazonalidade climática natural, é influenciado pela dinâmica de atuação de diferentes modos de variabilidade climática, incluindo as diferentes fases verificadas na temperatura da superfície do mar (TSM), tanto do Pacífico e, no caso do NEB, principalmente do Atlântico, acarretando em modificações nos seus três principais parâmetros: intensidade, direção e magnitude, tornando extremamente necessário o desenvolvimento de técnicas que melhorem seu monitoramento e principalmente a sua previsão.

É neste cenário que essa pesquisa se propõe a investigar a velocidade do vento no NEB sob diferentes perspectivas nos últimos 60 anos, de 1961 a 2020, avaliando se houve mudanças na intensidade, identificando regiões homogêneas e avaliando a tendência do vento nesse período.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Geral**

Analisar séries temporais da velocidade do vento à superfície no NEB nos últimos 60 anos, de 1961 a 2020, quanto as seguintes características estatísticas: sazonalidade, tendências, mudança estrutural e homogeneidade.

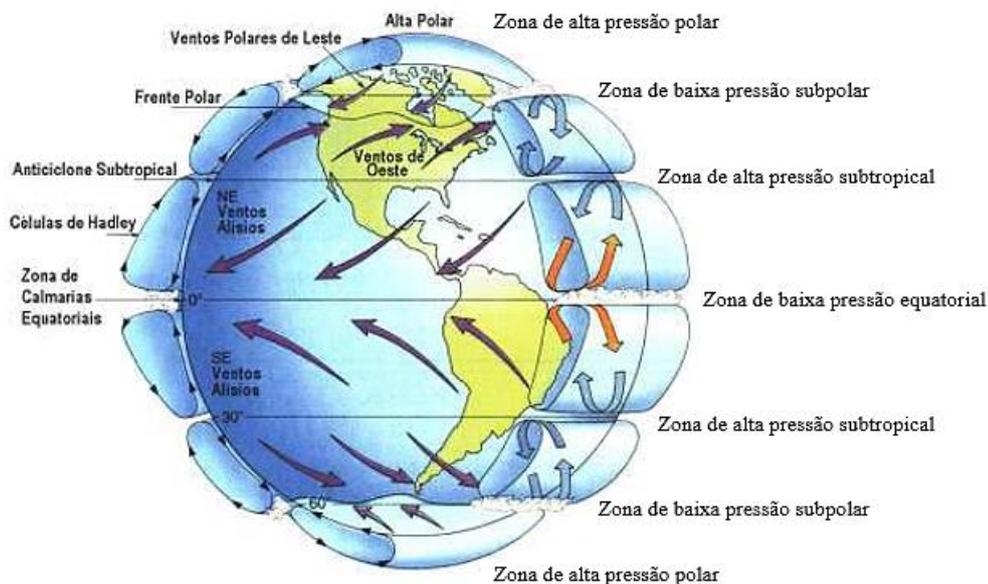
### **2.2 Específicos**

- Identificar e caracterizar regiões eolicamente homogêneas no NEB.
- Avaliar possíveis diferenças entre duas normais climatológicas oficiais para a velocidade do vento: 1991-2020 versus 1961-1990.
- Analisar estrutura e tendências da velocidade do vento nos últimos 60 anos nas respectivas regiões homogêneas.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Circulação Geral da Atmosfera (CGA)

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define um período de 30 anos para que as condições médias de variáveis atmosféricas, como pressão, umidade, precipitação, temperatura e vento possam caracterizar o clima de um local (Diniz et al., 2018). Do contrário, cada observação pontual que ao longo desse período define o clima, isoladamente são apenas condições de tempo. O clima de qualquer região do Planeta é determinado pela circulação geral da atmosfera (CGA), que redistribui calor por difusão de momentum por todo o globo. Mesmo assim, essa distribuição é irregular, com mais energia armazenada no equador e declinando em direção aos polos. A diferença de temperaturas associada a esse feito, sua interação com oceanos e continentes, provoca sistemas de circulação secundários caracterizados por depressões e anticiclones em latitudes médias e perturbações tropicais. Outros tipos de circulações consistem nos sistemas de ventos locais, tais como as brisas marítima e terrestre (Pereyra-Castro et al., 2020). A Figura 1 mostra o esquema de três células da CGA.



**Figura 1.** Modelo tricelular de circulação geral da atmosfera.

Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica (2001).

No esquema de três células, o NEB localiza-se numa zona de circulação se dirige para o equador convergindo na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na faixa entre as latitudes de 30° N e 30° S. A célula de convergência que domina essa região é conhecida por célula de Hadley, cujos ventos de superfície são os Alísios, considerados os mais constantes do planeta.

Os ventos alísios são considerados as maiores fontes energéticas da região tropical, estendendo-se verticalmente até 2 km da superfície (Jardim et al., 2016).

Os ventos alísios são determinantes para o clima do NEB, que apresenta grande variabilidade temporal e espacial na distribuição de chuvas e temperaturas, reforçada pela interação oceano-atmosfera e variação de altitude que alteram a atuação dos diversos sistemas meteorológicos atuantes nessa região (Hastenrath e Heller., 1977; Kousky e Gan., 1981; Giannini et al., 2001, Molion e Bernardo., 2002; Fedorova et al., 2009; Rodrigues et al., 2010; Kulikova et al., 2014; Rodrigues e McPhaden , 2014; Lira et al., 2017; Silva et al., 2018; Fedorova et al., 2019; Medeiros e Oliveira, 2020). Outros fatores para mudanças espaço-temporal do clima sobre o NEB devem-se pela mudança do uso do solo e, conseqüentemente, mudança no balanço de energia, elevando a temperatura do ar e da variação das velocidades do vento para algumas partes do NEB (Silva et al., 2018; Marengo et al., 2020; da Rocha Júnior et al., 2021).

### **3.2 Variabilidade do Vento no Nordeste**

A velocidade de vento média anual é um dos mais importantes fatores a ser considerado nos estudos eólicos. Este parâmetro é muito utilizado como referência em estudos de viabilidade técnica e econômica de projetos eólicos (Li et al., 2021). A principal condicionante para as variações interanuais no Nordeste está ligada às mudanças permanentes nos padrões climáticos do planeta (por exemplo, a elevação da temperatura global) e pequenas irregularidades nos ciclos interanuais da ZCIT (por exemplo, episódios de El Niño e La Niña).

As mudanças no comportamento da circulação geral da atmosfera ao longo do ano provocam significativas variações sazonais da velocidade e da direção predominante do vento. Estas variações estão associadas principalmente a movimentação da ZCIT ao longo do ano e forte efeitos de mesoescala, como gradientes térmicos oceano-continente no litoral e variações térmicas e gravitacionais no interior (Utida et al., 2019). Embora apresentando grandes amplitudes, as variações sazonais no Nordeste possuem uma forte regularidade de ano para ano.

Nos meses de fevereiro e março, devido a maior proximidade da ZCIT - caracterizada por forte convecção e chuvas contínuas - a intensidade dos ventos tende a diminuir. Nos outros meses, o retorno da ZCIT para as latitudes equatoriais provoca maiores gradientes de pressão atmosférica (Schneider et al., 2014). Este fato contribui para uma intensificação dos ventos. Em

agosto e setembro, os ventos Alísios atingem o seu ápice, com intensidade e constância notável. Aliado a isso, no verão observa-se uma intensificação dos efeitos das brisas marítimas (Anjos e Lopes, 2019).

As variações sazonais da velocidade são de grande importância em estudos eólicos, pois tem um efeito significativo na capacidade das turbinas eólicas de complementar a demanda da rede elétrica; principalmente no Nordeste, onde ocorre uma forte relação de complementaridade sazonal dos recursos eólicos para com os recursos hídricos (Freitas et al., 2022).

Bruscas e fortes variações, com periodicidade diurna, na velocidade e na direção do vento estão ligadas às diferenças de temperatura entre superfícies. No litoral do Nordeste, estas variações são, principalmente, ocasionadas por brisas marítimas e terrestres (Anjos e Lopes, 2019). Vale lembrar que a influência das brisas marítimas pode perdurar por uma extensão relativamente longa continente adentro (Alcântara e Souza, 2009). Já no interior, ocorrem fortes ciclos térmicos em montanhas e vales (brisas de montanhas/vales), associados a grandes efeitos orográficos (efeito de canalização).

Ambos os fenômenos se caracterizam por grandes variações de velocidade e direção do vento ao longo do dia, embora sejam de grande regularidade. Estas variações são de grande importância nos projetos eólicos (Ortiz e Kampel, 2011). A velocidade do vento é sempre flutuante, logo a energia disponível no vento estará sempre variando. Estas variações são associadas diretamente às condições de superfície do local, como a topografia, a rugosidade e os obstáculos. E variam numa escala de tempo de minutos a décimos de segundos (Liu et al., 2022).

Várias medições anemométricas realizadas no litoral nordestino atestam a ocorrência dos baixos níveis de turbulência (Feitosa et al., 1998; Feitosa et al., 2002). Isso ocorre porque os ventos alísios prevalecem em uma extensa faixa oceânica. À medida que se segue para o interior do continente, há uma tendência de aumento nos níveis de turbulência, devido a maior influência da forma topográfica, da rugosidade superficial e dos obstáculos naturais.

### **3.3 Influência da TSM no Clima do Nordeste**

Dois modos de variabilidade de natureza oceano-atmosfera possuem grande relevância referindo-se ao clima do NEB: o ENOS e o dipolo de temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico tropical possuem forte influência na variabilidade climática do NEB. De acordo

com diversos estudos na literatura (Moura e Shukla, 1981; Hastenrath, 1990; Nobre e Shukla, 1996), em anos de El Niño o NEB tende a apresentar um acumulado de precipitação inferior à climatologia, ao passo que é em anos de La Niña, há maiores probabilidades do acumulado de precipitação ultrapassar a climatologia. Já o dipolo do Atlântico também alterna fases positivas e negativas de TSM. A fase positiva deste padrão caracteriza-se por anomalias de TSM positivas no setor norte do Atlântico tropical, com ventos e pressão ao nível do mar com anomalias positivas, já na fase negativa do dipolo de TSM, estas características são contrárias.

Oliveira e Kayano (2020), analisaram padrões de precipitação associados com os ENOS na América do Sul por meio de índices calculados com valores de TSM, investigando os efeitos da oscilação decenal do Pacífico dividindo dois períodos para melhor acurácia nos resultados: fase fria (1948-1976) e fase quente (1976-2002). Os resultados para o NEB indicaram relação direta do regime de precipitação e de ventos à tais fases.

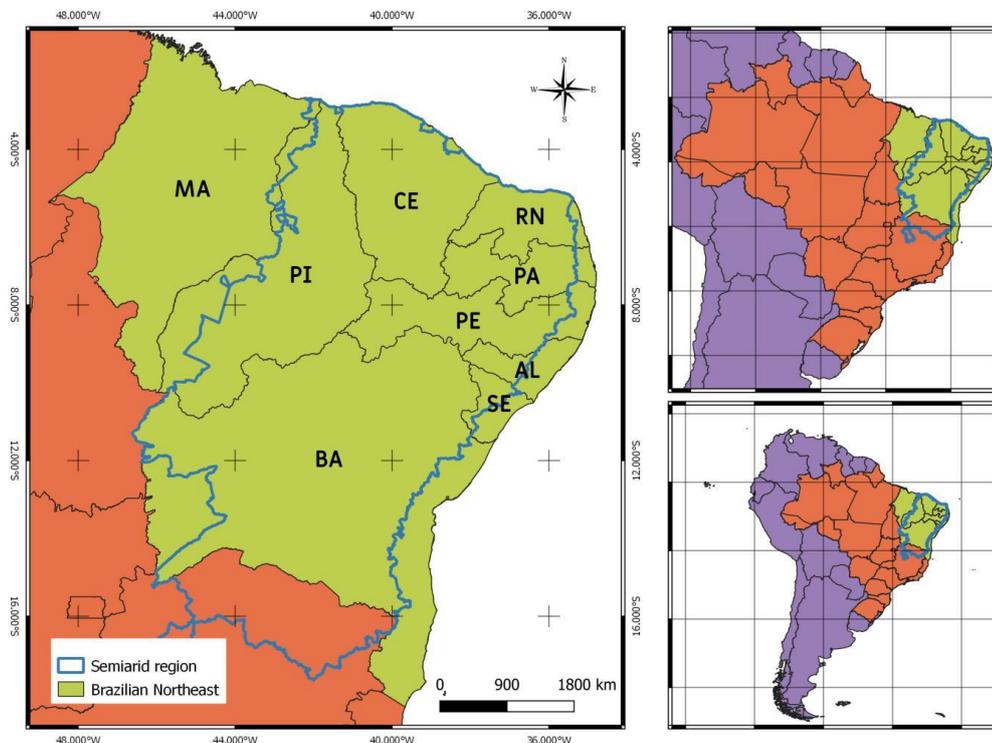
Xavier (2003) correlacionou os episódios de eventos dos ENOS com a variação dos posicionamentos da ZCIT, a fim de obter valores das chuvas acumuladas nas principais bacias hidrográficas do Ceará durante a quadra chuvosa, corresponde ao período de fevereiro a maio. Como resultado preliminar ficou nítido o papel das ocorrências de eventos ENOS no Pacífico, com relação à descida para o sul da ZCIT no Atlântico e, também, com as chuvas nas bacias.

É sabido que o regime de ventos do NEB apresenta maiores intensidades no segundo semestre do ano, principalmente no norte do NEB, devido a não ocorrência de chuvas, ou seja, no NEB é perceptível a relação período chuvoso e velocidade dos ventos (Correia et al., 2000; Hounsou-Gbo et al., 2019).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de Estudo

O Nordeste do Brasil possui uma população por volta de 52 milhões de habitantes, com uma área de aproximadamente 1,56 milhões de km<sup>2</sup>, distribuído entre 9 estados, Bahia (BA), Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN), Ceará (CE), Piauí (PI) e Maranhão (MA), compreendendo 1794 municípios (da Rocha Júnior et al, 2020), de acordo com a Figura 1. O NEB se encontra numa região equatorial entre os paralelos 1-21°S e os meridianos 32-49°W. A vegetação característica da costa leste é mata atlântica. A vegetação presente na porção central do NEB (região semiárida) é a caatinga. A região de transição entre a caatinga e a mata atlântica é chamada de Agreste. A topografia da região unida à variados sistemas meteorológicos provocam uma grande variabilidade climática. O NEB possui três áreas de variabilidade pluviométrica homogênea: a porção central, o norte e a parte leste (Cavalcanti, 2016; Marengo et al, 2017; Alvalá et al., 2019; Costa et al., 2020). A região do semiárido é caracterizado como a região onde a precipitação anual é menor que 800 mm. No entanto ainda não há uma determinação de regiões homogêneas, por exemplo, para a velocidade do vento no NEB, lacuna que pretende-se contemplar nessa pesquisa.



**Figura 2.** Mapa de localização do NEB com a delimitação dos estados (Siglas) e da região do semiárido (contorno azul).

## 4.2 Dados Observados de Vento no NEB

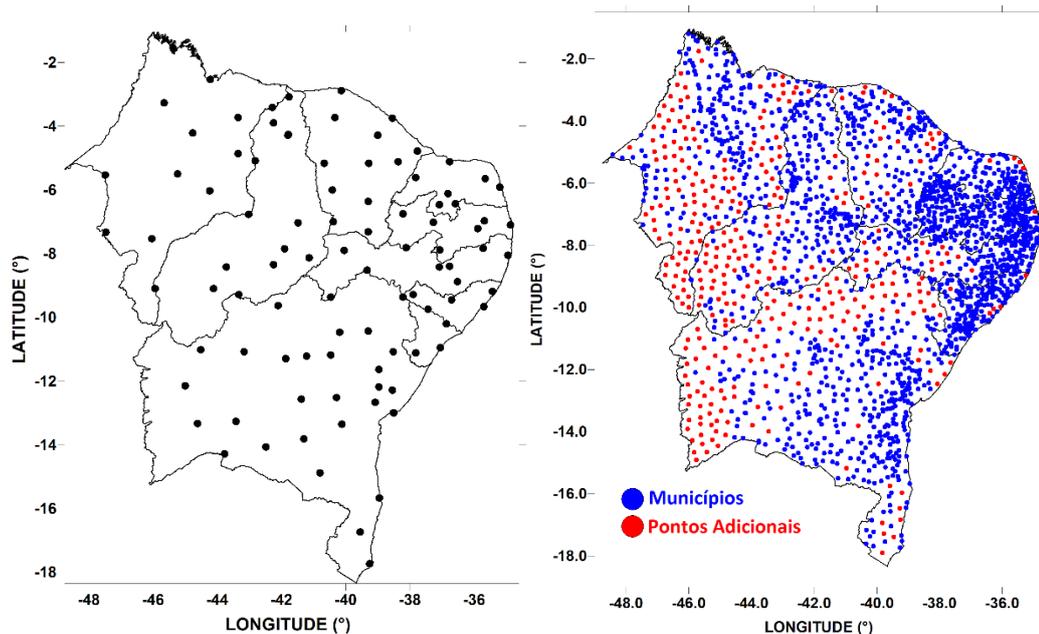
O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) tem 96 estações meteorológicas comuns localizadas na região nordeste, que medem a Precipitação (Prec), e outras variáveis necessárias para calcular a ET: Temperaturas Máxima, Mínima e Média, Umidade Relativa do Ar, Insolação, Pressão Atmosférica e Velocidade Média do Vento a 10 metros de altura, conforme mostrado na Figura 3 (esquerda).

Estes dados, somados a outros obtidos de estações automáticas e outras fontes de dados observados, foram usados para gerar uma análise gradeada de alta resolução espaço-temporal, disponibilizada por Xavier et al. (2022). Como descrito em seu trabalho, todos os dados de precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar coletados entre 1961 a 2020 foram expostos a um rigoroso controle de qualidade, e em seguida os dados foram interpolados seguindo os melhores resultados obtida via validação cruzada entre os métodos de ponderação pelo inverso da distância (IDW) e ponderação pela distância angular (ADW), para geração de uma grade em alta resolução de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Para nos atentar apenas à variável de interesse em nosso estudo, que é a velocidade do vento, descreveremos de forma sucinta nos parágrafos a seguir a metodologia empregada por Xavier et al (2022). Tais dados permitiram extrair 2072 séries temporais de velocidade do vento para o NEB, contemplando todos os municípios da região (Figura 3, à direita).

Para a temperatura, foram construídas duas grades, uma para temperatura máxima e outra para a temperatura mínima. Para a construção dessas grades, foi realizado um ajuste de elevação baseado nas alturas de cada ponto de estação que forneceu dados, baseado no *lapse rate* de temperatura de  $0.006^\circ\text{C}/\text{m}$ . Para representar o relevo topográfico do Brasil foi usado o Global Multiresolution Terrain Elevation Data 2010 (Danielson and Gesch, 2011), adquirido com resolução espacial de  $30'' \times 30''$ . Para a temperatura máxima, o método de interpolação que ofereceu o melhor resultado para a construção da grade foi IDW e para temperatura mínima o ADW, ambos ajustados pela elevação. Contribuíram para a construção da grade de temperatura dados de 1.375 estações espacialmente distribuídas pelo Brasil. Uma grade para a temperatura média foi obtida simplesmente pela divisão dos valores de máximas e mínimas. Os resultados dessa nova grade ajustada pelo *lapse rate* demonstrou maior correlação e menores erros do que os obtidos pela grade construída e detalhada em Xavier et al (2016), que não possuía essa correção de altitude.

Análogo a construção da grade de temperatura, foram construídas as grades em alta resolução da radiação solar e da velocidade do vento. Para essas variáveis o método de interpolação que se mostrou mais eficiente foi o ADW. A menor performance da radiação solar foi observada na bacia amazônica com correlação de 0.689, e a melhor na área da bacia do rio Uruguai e na região do Atlântico Sul, com correlações de 0.94 e 0.92, respectivamente. Para o NEB, as correlações variaram de 0.91 a 0.94. A umidade relativa e a velocidade do vento apresentaram resultados similares aos da radiação solar.

Os dados da análise gradeada de Xavier foram testados em vários estudos e vem servido como verdade de superfície em diferentes pesquisas (da Silva et al., 2018; da Rocha Júnior et al., 2019; Paredes-Trejo et al., 2019; Lucas et al., 2022; Herdies et al., 2023; Silva et al., 2023). Dessa forma, utilizou-se tal análise para extrair as séries temporais de velocidade do vento para o NEB mostradas na Figura 3 à direita, que será usada como a base observacional para fins de análise dessa pesquisa.



**Figura 3.** À esquerda, distribuição espacial das 96 estações meteorológicas convencionais do INMET no NEB. À direita, pontos extraídos da análise gradeada de Xavier para cada município (pontos pretos).

### 4.3 Identificação de Regiões Homogêneas Via Análise de Agrupamento

Com a distribuição de pontos mostrada na Figura 3, para os dados de velocidade do vento obtidos de Xavier, utilizou-se a técnica estatística multivariada conhecida como análise

de cluster para identificar áreas homogêneas baseadas na distribuição anual da velocidade do vento no NEB. O uso dessa técnica é comum para este propósito na área das ciências climáticas, definindo grupos que envolvem estações com características similares (Lyra et al, 2014; Santos et al, 2015; Costa et al, 2020; Silva et al, 2023). A estrutura de similaridade dos elementos de cada grupo é obtida pelo método da distância euclidiana (Mimmack et al., 2001), expressa pela equação 12:

$$d_e = \left[ \sum_{j=1}^n (P_{p,j} - P_{k,j})^2 \right]^{0,5} \quad (12)$$

onde  $d_e$  é a distância euclidiana, e  $P_{p,j}$  e  $P_{k,j}$  são as variáveis quantitativas  $j$  dos elementos  $p$  e  $k$ , respectivamente.

Para o agrupamento utilizou-se o método de Ward (1963), que identifica a menor variação entre os clusters (Hervada-Sala e Jarauta-Bragulat, 2004), unindo elementos cuja soma dos quadrados ou soma dos erros seja mínima, utilizando um método não supervisionado conhecido como K-means (André et al, 2008). O K-means visa agrupar os indivíduos de acordo com suas similaridades, aqui representadas pela distribuição mensal da ETo dos pontos extraídos da análise gradeada de Xavier no NEB. A soma dos quadrados dentro de cada grupo é verificada a partir do quadrado da distância euclidiana de cada elemento a cada grupo, de acordo com a equação 12 (Silva et al, 2023).

$$W = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \|x_i - \bar{x}_g\|^2 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^K (x_{i,k} - \bar{x}_{g,k})^2 \quad (13)$$

onde  $W$  representa a função de ligação de Ward, dada pela soma dos quadrados dentro de cada grupo ( $G_i$ ) (medida de homogeneidade);  $G$  é o número de elementos do grupo  $G_i$  na etapa  $k$  do processo de agrupamento;  $X_{i,k}$  é o vetor de observações do  $k$ -ésimo elemento pertencente ao  $i$ -ésimo grupo; e  $X_g$  é o centróide do grupo  $G_i$ .

#### 4.4 Análise de Tendências de Séries Temporais

Para analisar tendências em séries temporais, deve-se assumir uma hipótese nula ( $H_0$ ) de que não existe tendência nos dados. O resultado obtido, no entanto, permitirá que se acolha ou rejeite essa hipótese, no caso de ficar provado que há tendência (Helsel e Hirsch, 2002). Importante ressaltar que tendências são baseadas unicamente no histórico das séries, não se podendo afirmar que as mesmas continuarão indefinidamente no futuro.

Um dos objetivos específicos dessa pesquisa é estudar a estrutura das séries temporais de velocidade do vento nas regiões homogêneas encontradas na análise de cluster e suas tendências no período 1961-2020. Para a análise de tendências usaremos o teste não paramétrico de Mann-Kendall, e para avaliar a estrutura das séries temporais, o teste de homogeneidade de Pettitt, ambos brevemente descritos a seguir.

#### 4.4.1 Teste Não-Paramétrico de Mann-Kendall (MK)

O teste de MK é análogo a uma análise de regressão linear, sendo mais indicado como um teste para verificar se os valores da série temporal tendem a aumentar ou a diminuir com o tempo (mudança monotônica), por apresentar maior robustez quando comparado a outros testes paramétricos, por não precisar que sejam verificados alguns pressupostos quanto a normalidade dos dados e sua não-estacionariedade (Blain, 2011). Nesse teste, não deve existir correlação serial entre dados para que o *p-value* seja correto. Yan et al. (2015) mostraram que, para um conjunto de dados  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , desde que  $n > 4$ , o teste de Mann-Kendall  $S$  utiliza as seguintes fórmulas:

A estatística padronizada  $Z$  é calculada usando o desvio padrão ( $S$ ) e a variância  $Var(S)$  de acordo com a equação 14:

$$Z(s) = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

A estatística está próxima da normal quando  $n$  aumenta. Sendo a variância calculada pela equação 15:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (15)$$

O teste estatístico  $Z$  é usado como medida de significância de tendência, quando  $Z > 0$ , a tendência está aumentando, para  $Z < 0$ , a tendência está diminuindo. Ao testar as tendências ao nível de significância escolhido ( $\alpha = 0,05$ ),  $H_0$  é rejeitada sempre que  $Z(t) > Z_{\alpha/2}$  onde  $\alpha$  é o nível de significância e  $Z/2$  é a variável normalmente reduzida da função de distribuição normal padrão, então a hipótese nula é inválida, implicando que a tendência é significativa. No

teste de Mann-Kendell aplicado, valores de  $p < 0,05$  indicam tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%.

#### 4.4.2 Teste de Pettitt

O teste de Pettitt (Pettitt, 1979), será utilizado para detectar possíveis pontos de mudança nas séries de velocidade do vento nas regiões homogêneas do NEB. Este teste é comumente aplicado para identificar “quebras de patamar” em séries temporais de natureza climática (Pohlert, 2020), e utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney ( $U_t, T$ ), que verifica se duas amostras  $X_1, \dots, X_t$  e  $X_{t+1}, \dots, X_T$  pertencem à mesma população ou não. O teste não paramétrico é definido pelas equações 16 e 17:

$$K_t = \text{Max } |U_t, T| \quad (16)$$

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (17)$$

$$\text{para } t = 2, \dots, T$$

A estatística ( $U_t, T$ ) é então calculada para os valores de  $1 < t < T$ . Na hipótese nula e para cada  $t$ , a distribuição de ( $U_t, T$ ) é simétrica em torno de zero com  $K_t = 0$ . Espera-se que haja grandes valores para  $K_t$ , quando houver um ponto de mudança nos dados. O ponto de mudança da série está localizado no  $K_t$ , desde que a estatística seja significativa. A probabilidade de significância de KT pode ser calculada pela equação 18:

$$p = 2 \exp\{-6k_T^2 / (T^3 + T^2)\} \quad (18)$$

onde:  $p$  = nível de significância;  $K_t$  = é o valor crítico;  $T$  = é o número de dados na série.

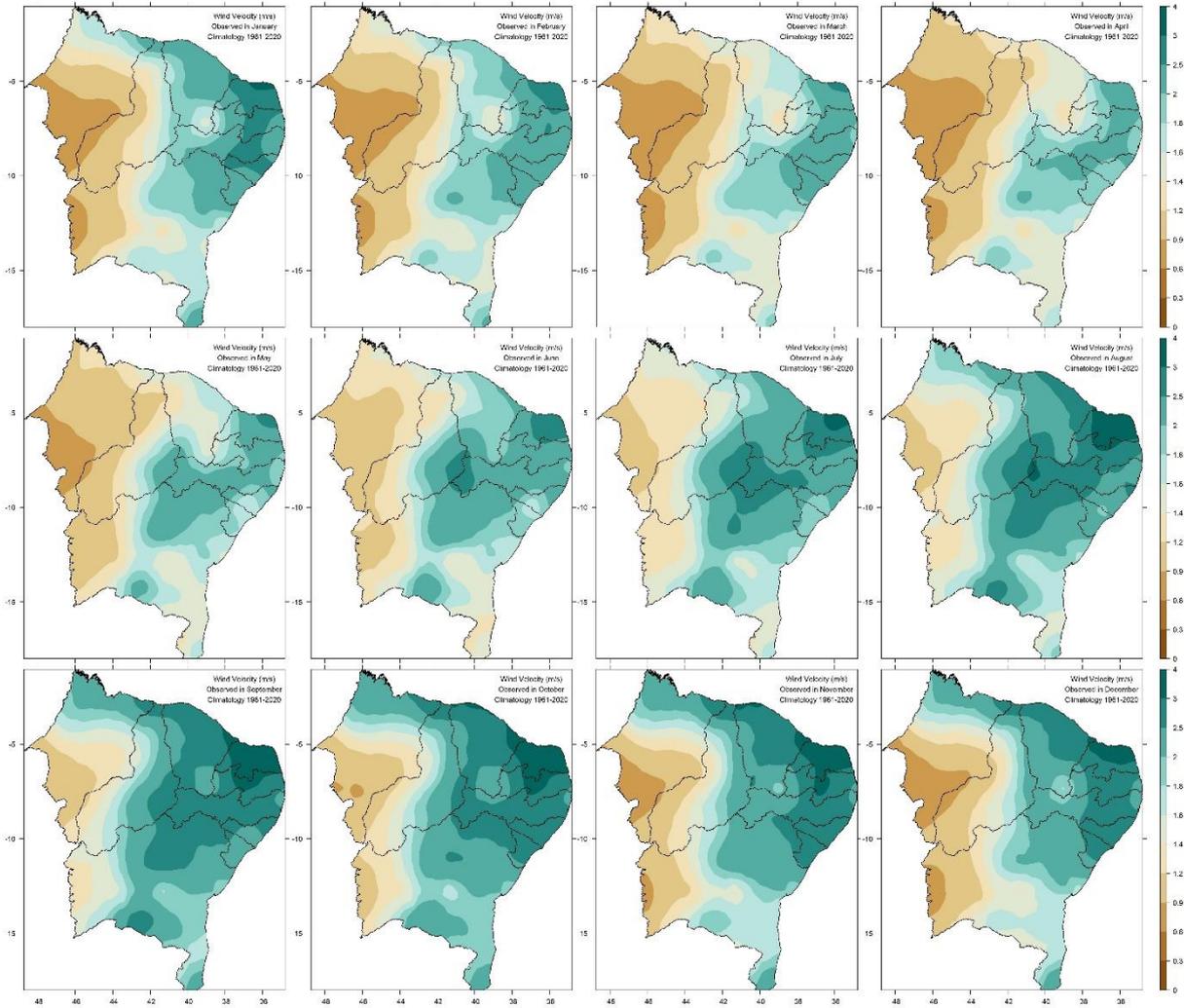
Estudos desenvolvidos no Brasil avaliaram tendências e pontos de mudanças em séries de variáveis meteorológicas aplicando os testes de Mann-Kendall e Pettitt (dos Santos, *et al.*, 2012; Salviano *et al.*, 2016; Almeida *et al.*, 2017, dos Santos e Oliveira, 2017; da Silva *et al.*, 2018). Primeiramente se faz necessário verificar a existência de normalidade na série de dados, sendo geralmente aplicado o teste de Shapiro-Wilk para essa verificação (Shapiro e Wilk, 1965). Estes pré-requisitos metodológicos serão aplicados na realização desse trabalho.

## 5. RESULTADOS

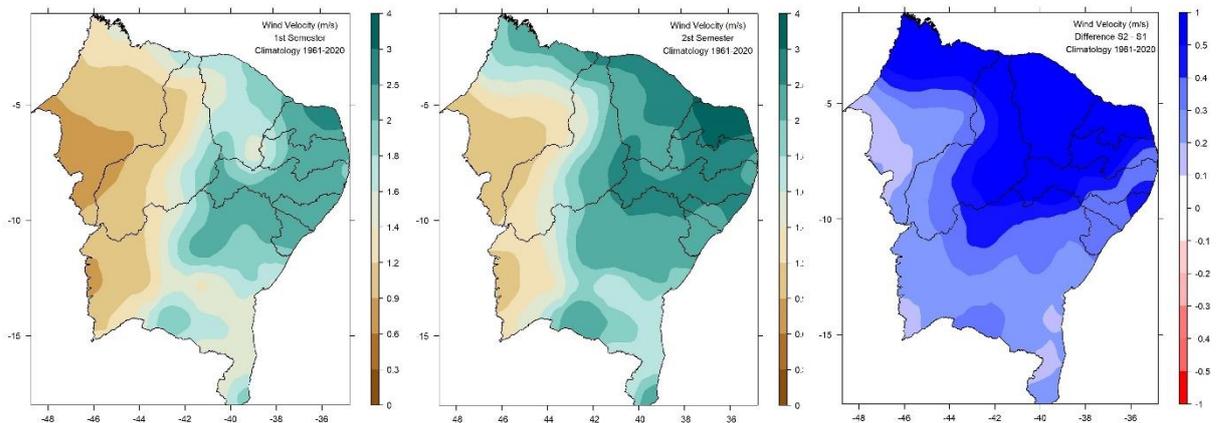
### 5.1. Climatologia da Velocidade do Vento no Período 1961-2020

A partir das séries temporais da velocidade do vento de cada município do NEB, obteve-se os valores médios mensais para o período 1961-2020, apresentados na Figura 4. Nota-se claramente um gradiente leste-oeste na intensidade do vento, com as maiores velocidades no leste do NEB e as menores no oeste do NEB. Destaca-se nesse cenário o estado do Rio Grande do Norte, com as maiores médias observadas entre 3 a 4 m/s, principalmente no segundo semestre do ano. Outros estados do leste do NEB, como Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e nordeste baiano, apresentam velocidades constantes durante todo o ano, menos intensas entre fevereiro a maio, entre 1,5 a 2 m/s, e mais intensos de agosto a janeiro, quando podem alcançar 4 m/s. O oeste do NEB, principalmente no centro-sul maranhense e piauiense, e extremo oeste baiano, apresentam as menores velocidades do vento durante todo o ano, principalmente de dezembro a maio, quando os ventos são em média inferiores a 0,5 m/s. No entanto, o norte do Maranhão e Piauí apresentam ventos intensos no último quadrimestre do ano, de setembro a dezembro, enquanto na Bahia ainda há áreas de ventos mais intensos na sua porção centro-sul também de setembro a dezembro.

Os resultados apresentados nessa análise climatológica deixam evidente que o primeiro semestre do ano (S1) é o que apresenta as menores intensidades do vento enquanto as maiores são observadas no segundo semestre (S2). A Figura 5 mostra, no painel superior, as médias semestrais da velocidade do vento, e no painel inferior, a diferença entre S2 e S1. Nota-se que no centro-sul do NEB a velocidade do vento é superior de 0,1 a 0,3 m/s no S2, enquanto no centro-norte do NEB, incluindo o norte maranhense, centro-norte e sudeste piauiense, todo Ceará e Rio Grande do Norte, quase toda a Paraíba, sertão pernambucano, norte baiano, e parte da porção leste de Pernambuco e Alagoas, a velocidade do vento chega a ser 1 m/s mais intensa no S2. No norte e leste do NEB, a intensidade dos ventos está relacionada a qualidade do período chuvoso. Coincidentemente, no norte do NEB a intensidade é mais fraca nos meses de maior migração para sul da ZCIT, entre fevereiro e abril (Oliveira e Costa, 2011). A ZCIT apresenta grande oscilação interanual em seu deslocamento, sendo mais significativa sobre os oceanos, tendo, portanto, a TSM como um dos fatores determinantes na sua posição e intensidade (Ferreira e Mello, 2005; Carvalho, 2013). Barros et al. (2017), por exemplo, constatou que a posição mais a sul da ZCIT influencia negativamente a geração de energia eólica no Ceará.



**Figura 4.** Climatologia mensal da velocidade do vento (m/s) no NEB. Período: 1961-2020.

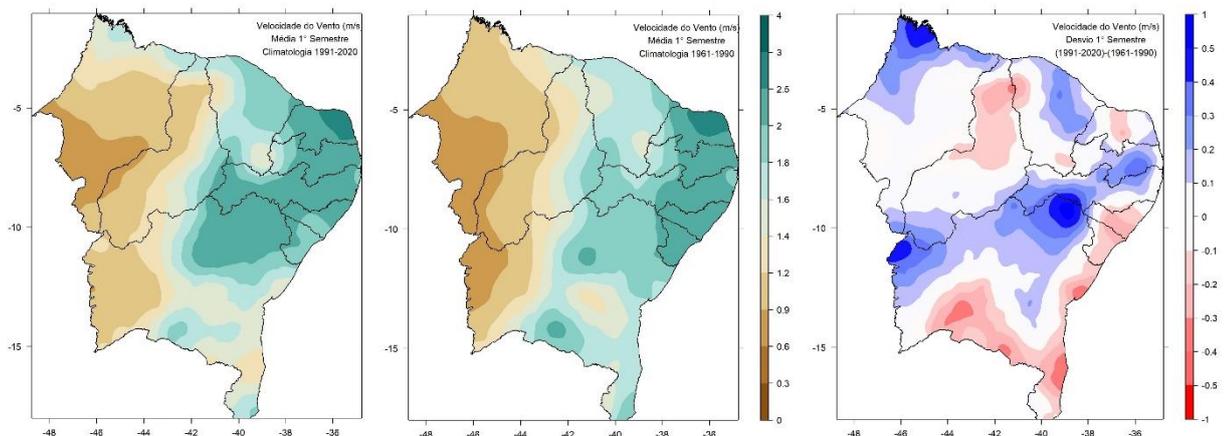


**Figura 5.** Climatologia da velocidade do vento (m/s) no NEB no primeiro semestre (S1), à esquerda; e no segundo semestre do ano (S2), no centro, e respectiva diferença entre S2 e S1, à direita. Período: 1961-2020.

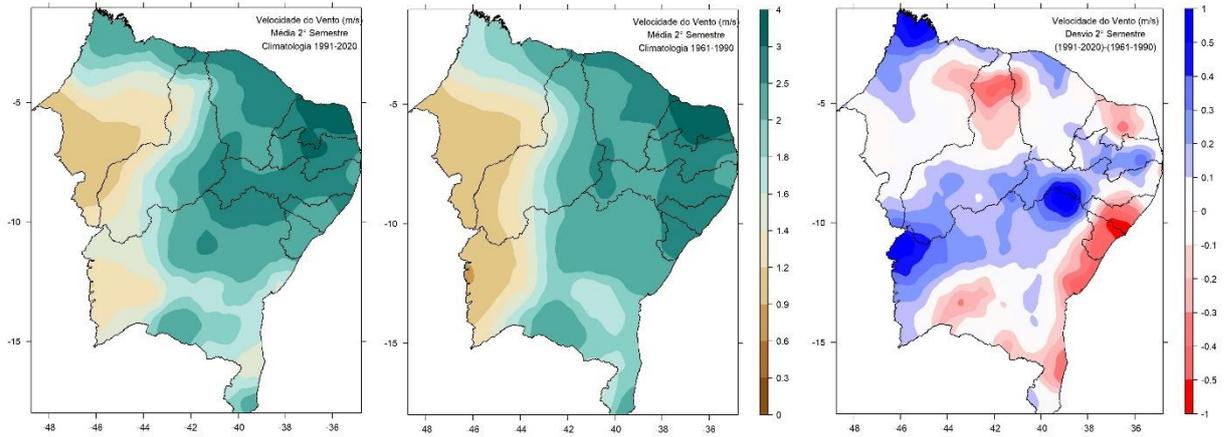
Buscou-se ainda nessa análise climática, verificar se houve algum tipo de alteração na intensidade dos ventos no período 1961-2020. Para isso, dividiu-se esses 60 anos em dois períodos climatológicos de 30 anos: 1961-1990 e 1991-2020. Para resumir e chegar mais facilmente a essa resposta, foram calculadas as médias semestrais e anual da velocidade dos ventos nesses dois períodos, definidos como C1 (climatologia de 1961-1990) e C2 (climatologia de 1991-2020).

A Figura 6 mostra que houve, para o primeiro semestre do ano no período 1991-2020, aumento da intensidade dos ventos no extremo norte maranhense, no centro-norte cearense, na porção central da Paraíba estendendo-se pelo sertão pernambucano até o centro norte e extremo oeste da Bahia, alcançando o extremo sul do Piauí. Por outro lado, houve redução nas velocidades observadas na porção central do Piauí e, principalmente, no leste dos estados de Alagoas e Sergipe, e no leste e centro-sul da Bahia. Esse padrão observado no primeiro semestre se mantém para o segundo semestre do ano (Figura 7), porém com valores mais fortes, o que é natural por esse ser o semestre que apresenta as maiores velocidades do vento, em média.

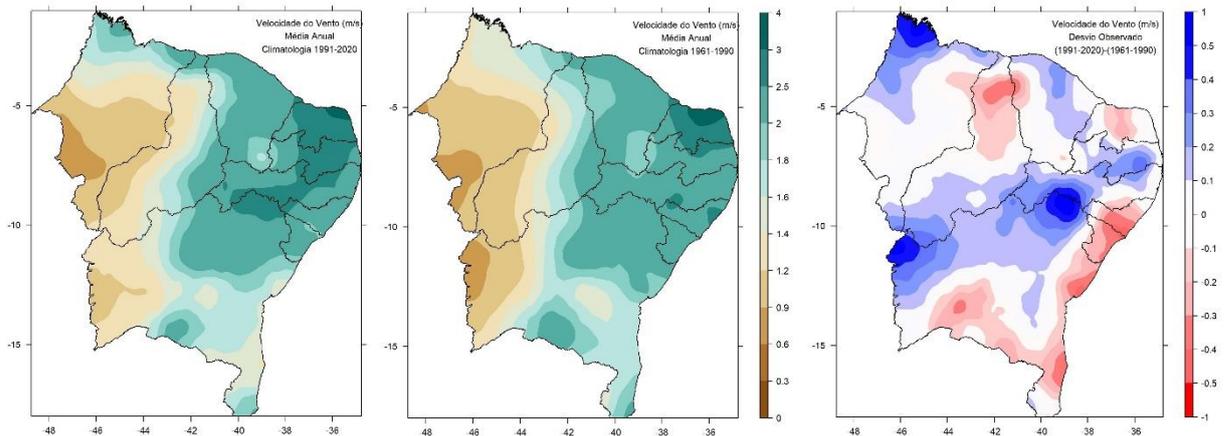
Três fortes núcleos de desvios positivos de velocidade aparecem no noroeste maranhense, área fronteiriça entre sertão pernambucano e baiano, e no extremo oeste baiano. Já os desvios negativos desde o centro-leste alagoano e Sergipe apresentam-se, também, mais fortes, indicando possível diminuição da intensidade dos ventos nessa área do NEB. Essas características observadas nos dois semestres, são sintetizadas nos mapas de desvios médios anuais, mostrados na Figura 8.



**Figura 6.** Climatologia da velocidade do vento (m/s) no primeiro semestre do NEB, à esquerda para 1991-2020; no centro para 1961-1991, e respectiva diferença entre 1991-2020 e 1961-1990.



**Figura 7.** Climatologia da velocidade do vento (m/s) no segundo semestre do NEB, à esquerda para 1991-2020; no centro para 1961-1990, e respectiva diferença entre 1990-2020 e 1961-1990.



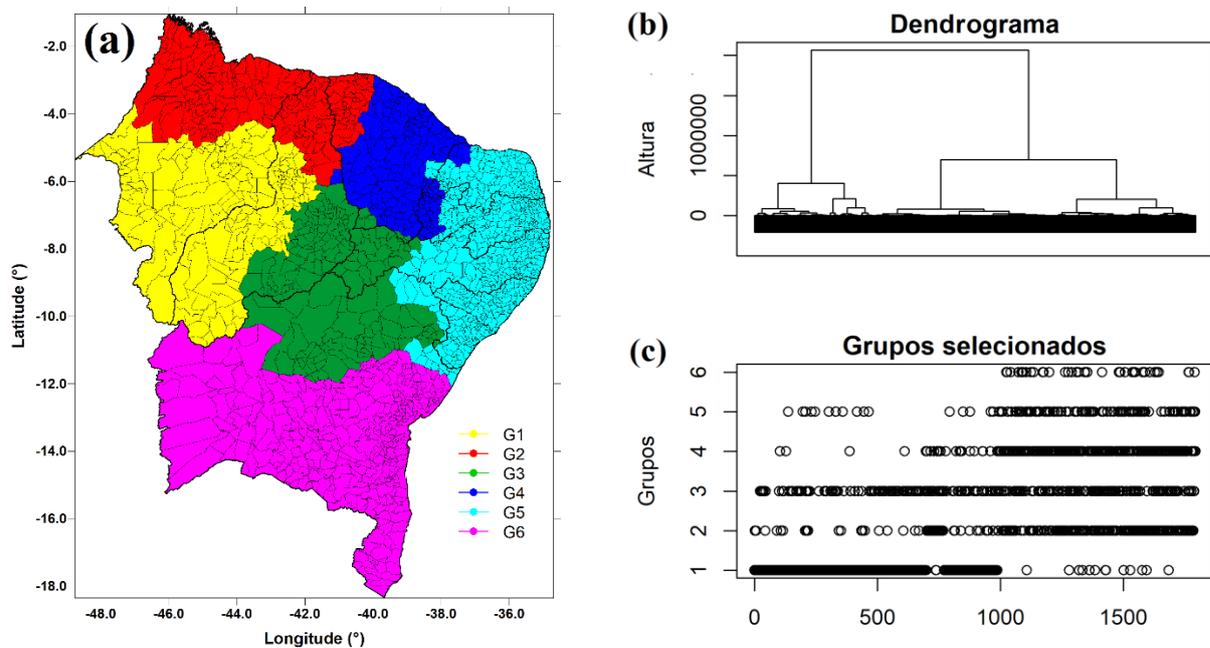
**Figura 8.** Climatologia da velocidade média anual do vento (m/s) do NEB, à esquerda para 1991-2020; no centro para 1961-1990, e respectiva diferença entre 1990-2020 e 1961-1990.

## 5.2. Identificação de Áreas Homogêneas de Velocidade do Vento

A análise de agrupamento foi empregada aos dados de velocidade do vento para encontrar regiões homogêneas, e, assim, compor séries médias baseadas nos pontos que compõem cada sub-região. Foram testados os valores médios mensais de cada ponto, mas os melhores resultados foram obtidos ao se aplicar a análise de agrupamento aos valores médios anuais.

Os testes variaram para 2 a 6 grupos, sendo selecionados e considerados satisfatórios, de acordo com a similaridade entre os pontos, 6 grupos, como mostra a Figura 9a. A Figura 9b

mostra um dendrograma bi-dimensional dos grupos determinados pelo método aglomerativo. Nesse diagrama, cada ramo representa um elemento, enquanto a raiz representa o agrupamento de todos os elementos. O gráfico mostrado na Figura 9c destaca os grupos selecionados, de acordo com uma distância de corte para definição dos grupos, com base em conhecimento prévio da natureza e estrutura dos dados.



**Figura 9.** Análise de agrupamento para seis áreas: (a) Distribuição espacial de cada grupo homogêneo (G), G1 com municípios destacados em amarelo, G2 com municípios destacados em vermelho, G3 com municípios destacados em verde, G4 com municípios destacados em azul escuro, G5 com municípios destacados em azul claro e G6 com municípios destacados em rosa; (b) dendrograma dos grupos e (c) grupos selecionados em seis diferentes níveis.

A distribuição dos grupos na Figura 9 mostra-se muito interessante, indicando que a técnica de análise de agrupamento, amplamente empregada para encontrar grupos homogêneos de precipitação e temperatura para o NEB (Lyra et al, 2014; Costa et al., 2020; Silva et al, 2023), deve ser aplicada a outras variáveis. A Tabela 1 mostra o número de elementos pertencentes a cada região homogênea, com a respectiva frequência relativa.

**Tabela 1.** Frequência absoluta e relativa do número de municípios pertencentes às sub-regiões homogêneas determinadas segundo a velocidade média mensal do vento no NEB.

Grupos	Número de elementos	Frequência Relativa (%)
1	312	15,1
2	253	12,2
3	241	11,6
4	214	10,3
5	677	32,7

6

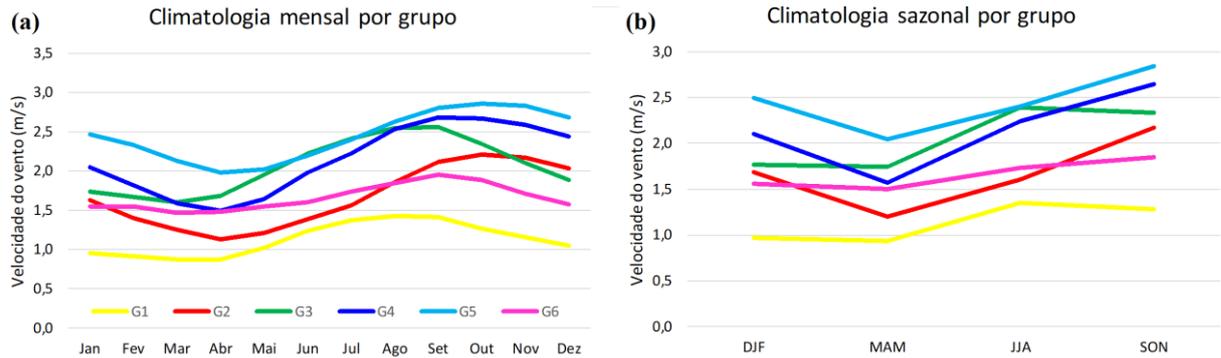
375

18,1

Na Figura 9, o Grupo 1 (G1) contém 312 pontos (15,1 % do total), situando-se na terceira colocação entre os grupos em número de elementos, destacados na cor amarela, abrangendo o centro-sul maranhense e sudoeste piauiense. O Grupo 2 (G2) é o quarto em número de elementos, com 253 pontos, ou 12,2 % do total, estendendo-se entre o norte maranhense, norte piauiense e noroeste cearense. O Grupo 3 agrupa os elementos do sudeste piauiense, oeste pernambucano e norte baiano, com 241 pontos (11,6% do total). O grupo 4 (G4) é o menor em número de pontos, com 214 ou 10,3 % do total, envolvendo quase todo Ceará com exceção de sua porção noroeste, pequena parte do noroeste potiguar e do oeste paraibano.

O grupo 5 (G5) é o maior em número de pontos, 677 ou 32,7 % do total, muito em parte devido ao grande número de municípios que existem nessa área do leste do NEB, desde o Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, totalidade dos pontos em Alagoas e Sergipe, e alguns pontos no extremo nordeste da Bahia. O Grupo 6 (G6) agrupa 375 pontos, ou 18,1% do total, localizando-se inteiramente em um único estado, envolvendo todos os municípios do centro-sul baiano.

Cada grupo possui características muito bem definidas. A análise do ciclo anual da velocidade do vento de cada grupo é mostrada na Figura 10, em níveis mensal (10a) e sazonal (10b). Os grupos contrastantes são o G1 e G5, com os menores e maiores valores de velocidade do vento ao longo do ano, respectivamente, com valores médios mensais inferiores a 1 m/s no G1 de janeiro a abril e que chegam próximos a 3 m/s entre setembro e dezembro no G5. Na análise sazonal, fica evidente que para todos os grupos, o verão e outono são as estações com ventos mais fracos, intensificando no inverno com ápice na primavera. Em termos médios anuais, o ranking decrescente entre os grupos em termos de velocidade média observada começa com o G5, com 2,45 m/s, G4 com 2,14 m/s, G3 com 2,06 m/s, G2 e G6 com 1,66 m/s, e G1 com 1,13 m/s.



**Figura 10.** Velocidade média mensal do vento obtida do conjunto de elementos para cada grupo homogêneo no NEB, (a) mensal e (b) sazonal.

### 5.3. Análise de Tendência da Velocidade do Vento no NEB de 1961 a 2020

Utilizamos o teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) para avaliar tendências nas séries temporais de cada grupo homogêneo identificado na análise de cluster. Para isso, construímos uma série representativa de cada grupo com base na média de todos os seus elementos. As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam as estatísticas descritivas dessas séries, para os períodos completos (1961-2020) e os períodos normais climatológicos (1961-1990 e 1991-2020).

**Tabela 2.** Estatísticas descritivas da velocidade do vento (m/s) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1961-2020.

Período: 1961-2020						
Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Mínimo	1,30	1,38	1,70	1,77	2,01	1,21
1° Quartil	1,46	1,65	2,05	2,09	2,37	1,61
Mediana	1,58	1,75	2,15	2,26	2,57	1,69
Média	1,58	1,78	2,15	2,26	2,55	1,68
3° Quartil	1,67	1,84	2,26	2,43	2,70	1,77
Máximo	1,94	2,33	2,63	2,70	3,10	2,05

**Tabela 3.** Estatísticas descritivas da velocidade do vento (m/s) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1961-1990.

Período: 1961-1990						
Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Mínimo	1,32	1,60	1,70	1,88	2,27	1,21
1° Quartil	1,53	1,70	2,08	2,25	2,53	1,66
Mediana	1,65	1,78	2,17	2,35	2,66	1,72
Média	1,65	1,86	2,18	2,34	2,64	1,73
3° Quartil	1,73	1,99	2,30	2,48	2,75	1,84

Máximo 1,94 2,33 2,63 2,60 3,10 2,05

**Tabela 4.** Estatísticas descritivas da velocidade do vento (m/s) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1991-2020.

Período: 1991-2020						
Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Mínimo	1,30	1,37	1,87	1,77	2,01	1,39
1° Quartil	1,43	1,55	2,03	2,01	2,29	1,56
Mediana	1,54	1,73	2,14	2,18	2,50	1,64
Média	1,52	1,69	2,13	2,18	2,45	1,64
3° Quartil	1,61	1,80	2,20	2,34	2,58	1,73
Máximo	1,78	2,09	2,41	2,69	2,95	1,88

A Figura 11 mostra as tendências usando o teste MK para os períodos completos de 1961-2020 (painel superior) e das normais climatológicas 1961-1990 e 1991-2020 (painel inferior, respectivamente). Para a região homogênea 1 (G1), há uma tendência decrescente na intensidade da velocidade do vento a partir da década de 1980, como pode ser observado nos gráficos do painel superior, onde há uma tendência ascendente desde o início da série até o final de década de 1970 e depois uma tendência negativa.

Para todo o período, a tendência é negativa e estatisticamente significativa, com um valor do parâmetro Tau de Kendall de -0,396 e respectivo p-valor de 0,0000097. No período 1961-1990 a tendência é ligeiramente positiva (Tau de Kendall = 0,0116) mas não estatisticamente significativa (p-valor = 0,94), enquanto no período 1991-2020 a tendência negativa é -0,615 com p-valor = 0,0000022. As Figuras 11 a 15 mostram as tendências para os grupos homogêneos G2 a G6.

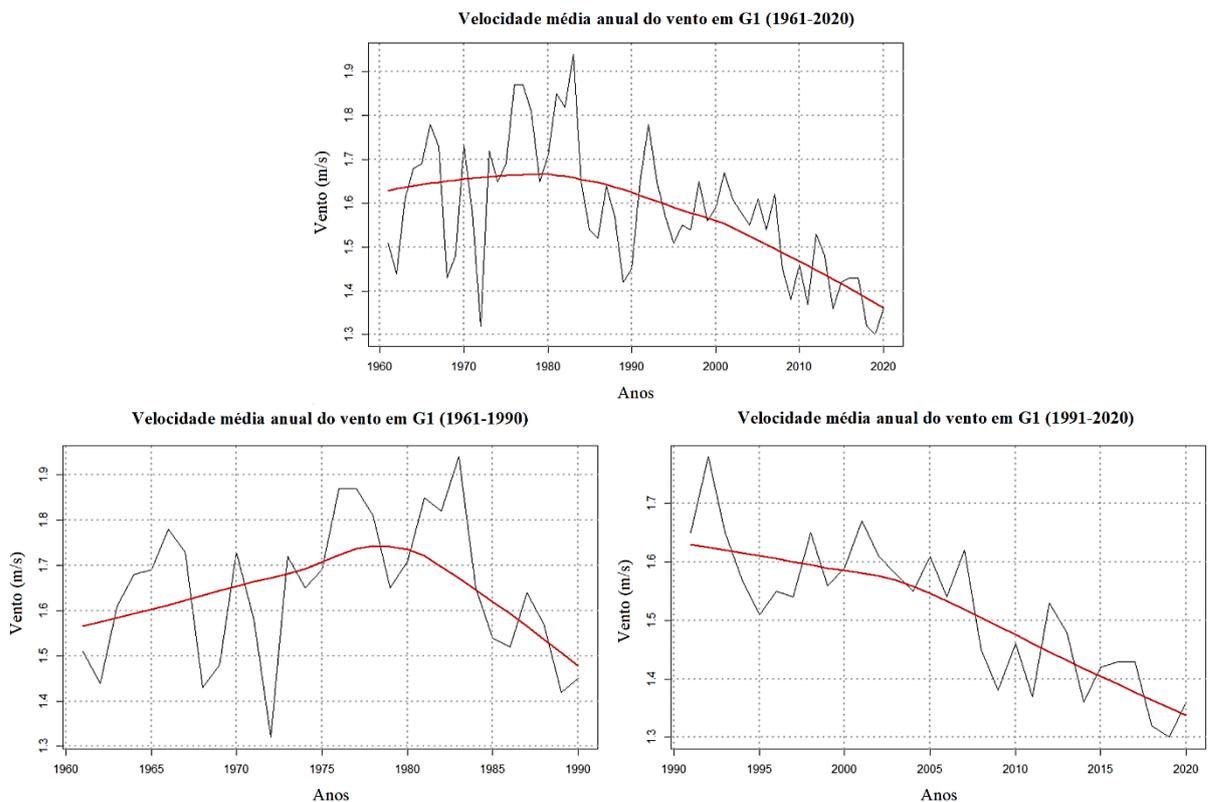
Esta é uma característica que se verifica nos gráficos das demais regiões homogêneas (G2 a G6), com o período 1991-2020 apresentando uma diminuição dos valores médios anuais da velocidade do vento, em todas as situações com significância estatística a um nível de confiança de 95 e/ou 99%, consoante o p-valor observado: para G2 (Figura 12) - Tau de Kendall = -0,706 e p-valor = 0,000000055; para G3 (Figura 13) - Tau de Kendall = -0,378 e p-valor = 0,0038; para G4 (Figura 14) - Tau de Kendall = -0,664 e p-valor = 0,0000003; para G5 (Figura 15) - Tau de Kendall = -0,63 e p-valor = 0,0000012; para G6 (Figura 16) - Tau de Kendall = -0,344 e p-valor = 0,0086.

As características e resultados do teste de MK, para todas as séries avaliadas são mostradas na Tabela 5.

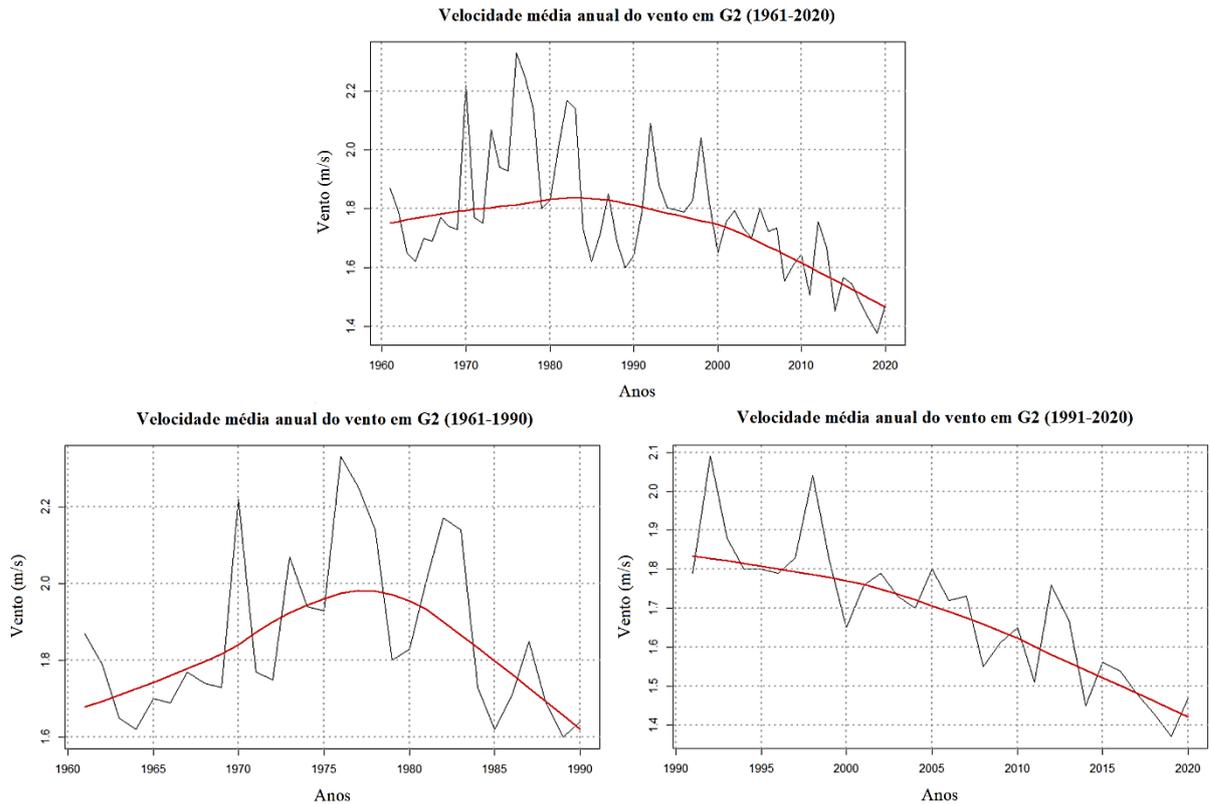
**Tabela 5.** Características e resultados do teste de Mann-Kendall nos três períodos climáticos analisados, para as seis regiões homogêneas de velocidade do vento do NEB.

Regiões	G1		G2		G3		G4		G5		G6	
	Tau	p-valor										
1961-2020	-0,40	0,00001**	-0,37	0,00004**	-0,22	0,01197*	-0,32	0,00028**	-0,34	0,00013**	-0,30	0,00074**
1961-1990	0,01	0,94305	0,00	1,00000	-0,16	0,23173	0,26	0,04915*	0,23	0,08007*	-0,09	0,49725
1991-2020	-0,62	0,00000**	-0,71	0,00000**	-0,38	0,00380**	-0,66	0,00000**	-0,63	0,00000**	-0,34	0,00862**

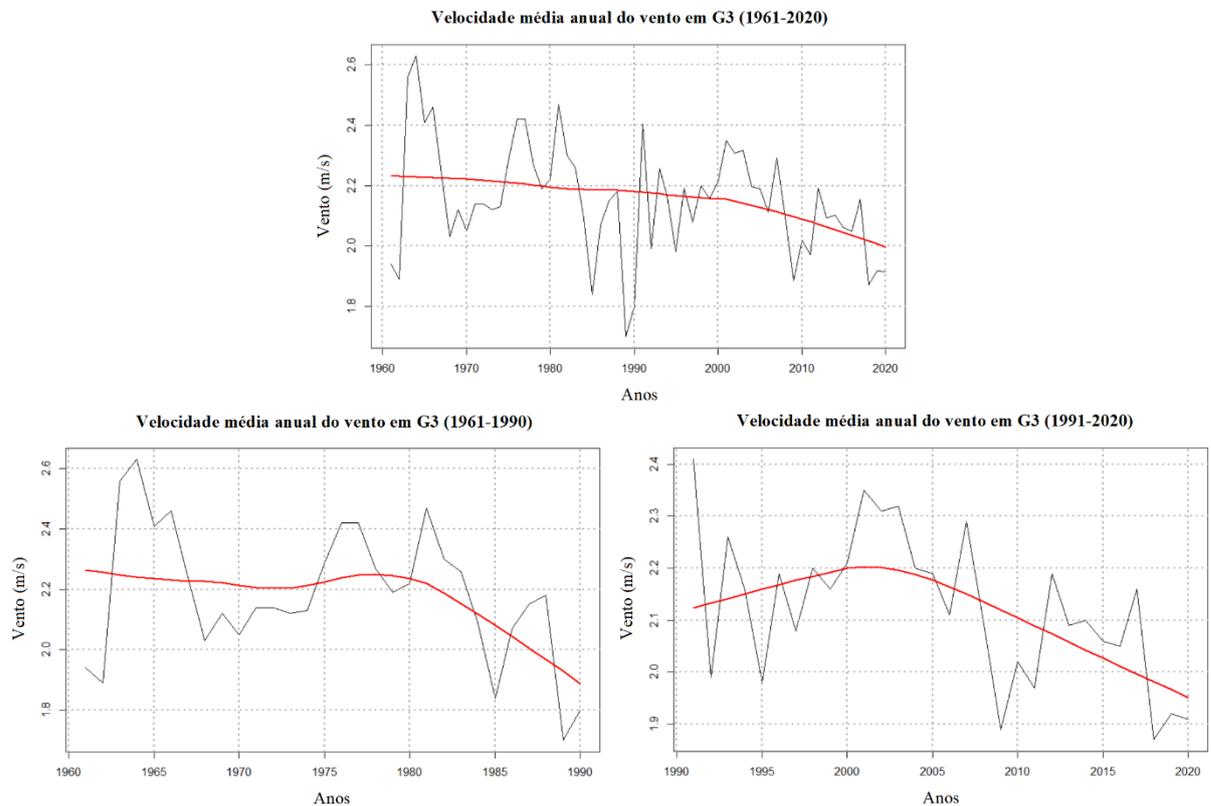
Nível de confiança: \*95%; \*\*99%.



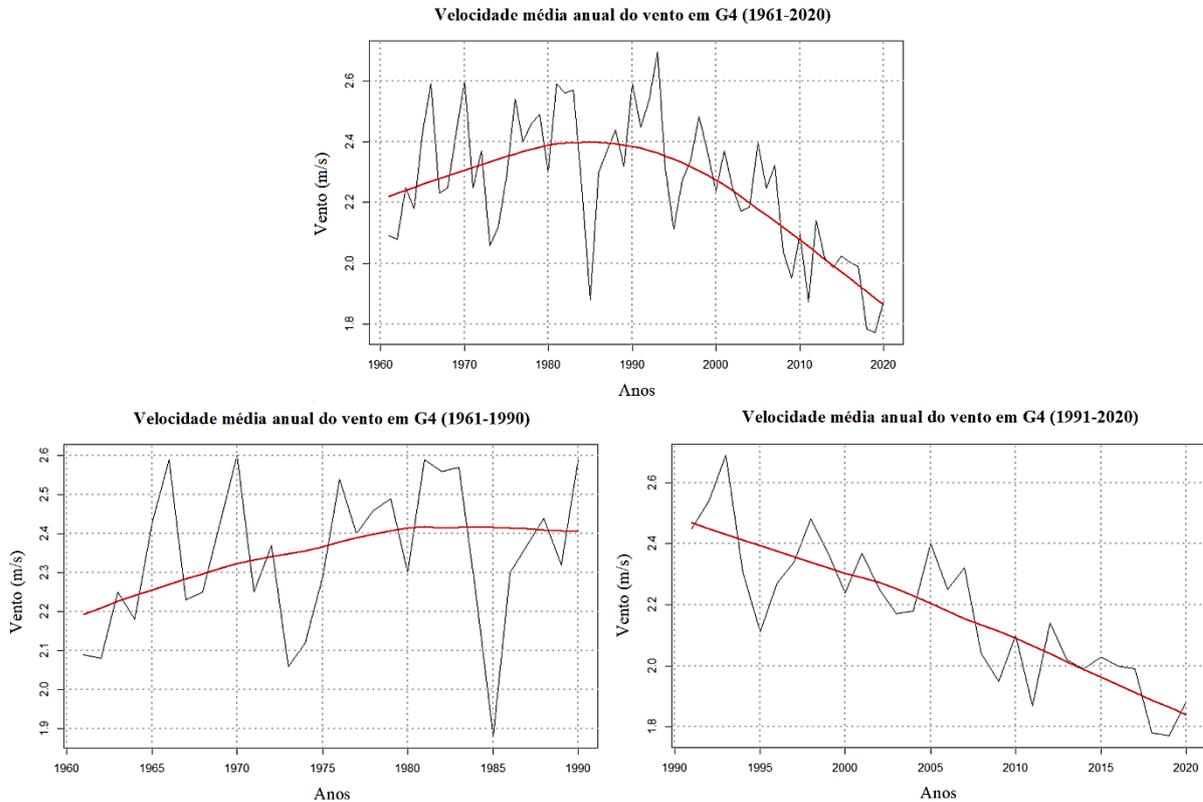
**Figura 11.** No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G1. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.



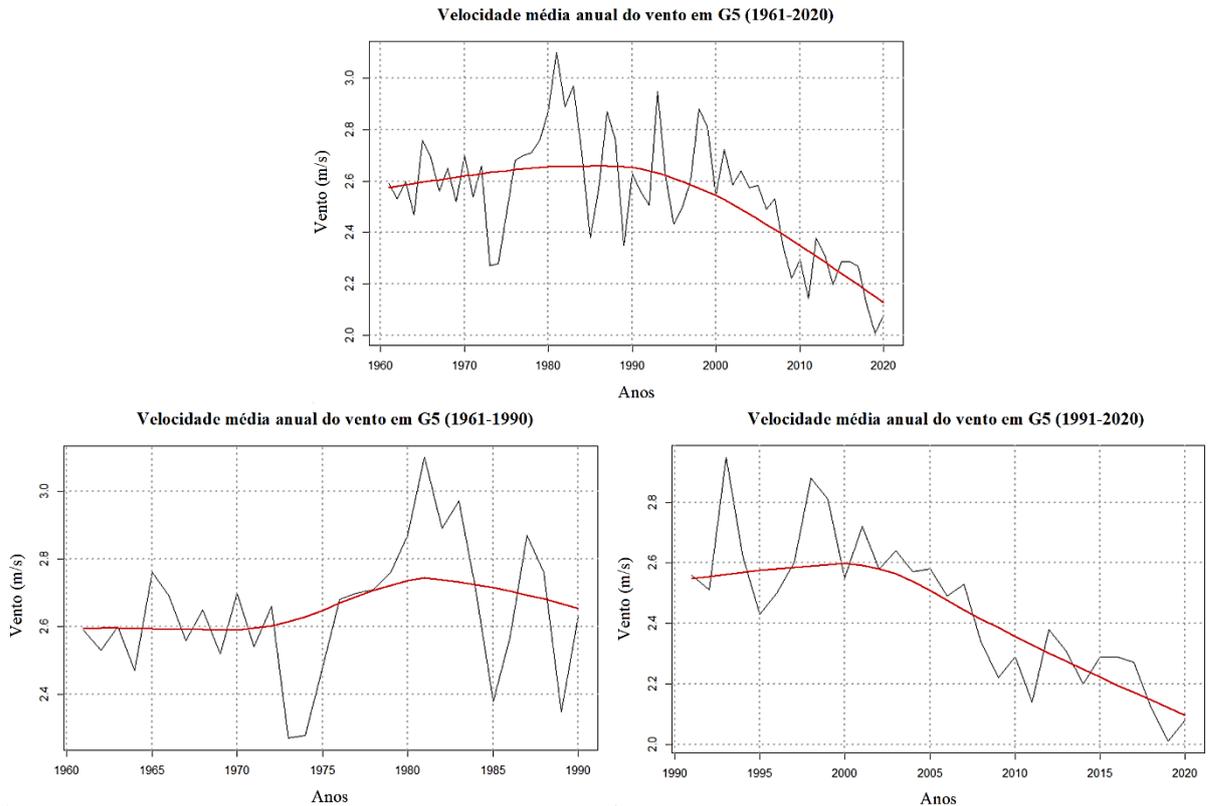
**Figura 12.** No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G2. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.



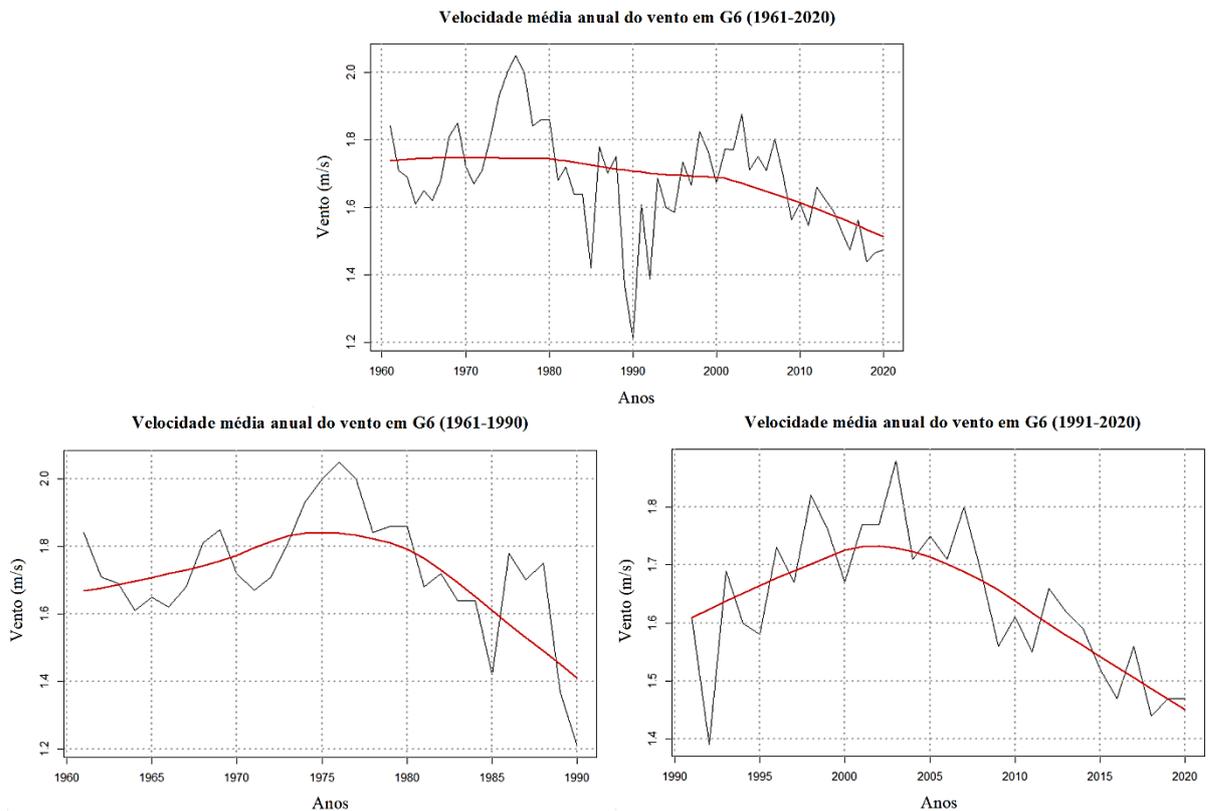
**Figura 13.** No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G3. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.



**Figura 14.** No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G4. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.



**Figura 15.** No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G5. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.



**Figura 16.** No painel superior: série temporal das médias anuais da velocidade do vento, em m/s, para o período 1961-2020 e a respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G6. O painel inferior mostra o mesmo, mas dividido entre os períodos climatológicos 1961-1990 e 1991-2020.

#### 5.4. Análise Estrutural das Séries Temporais Usando o Teste de Pettitt

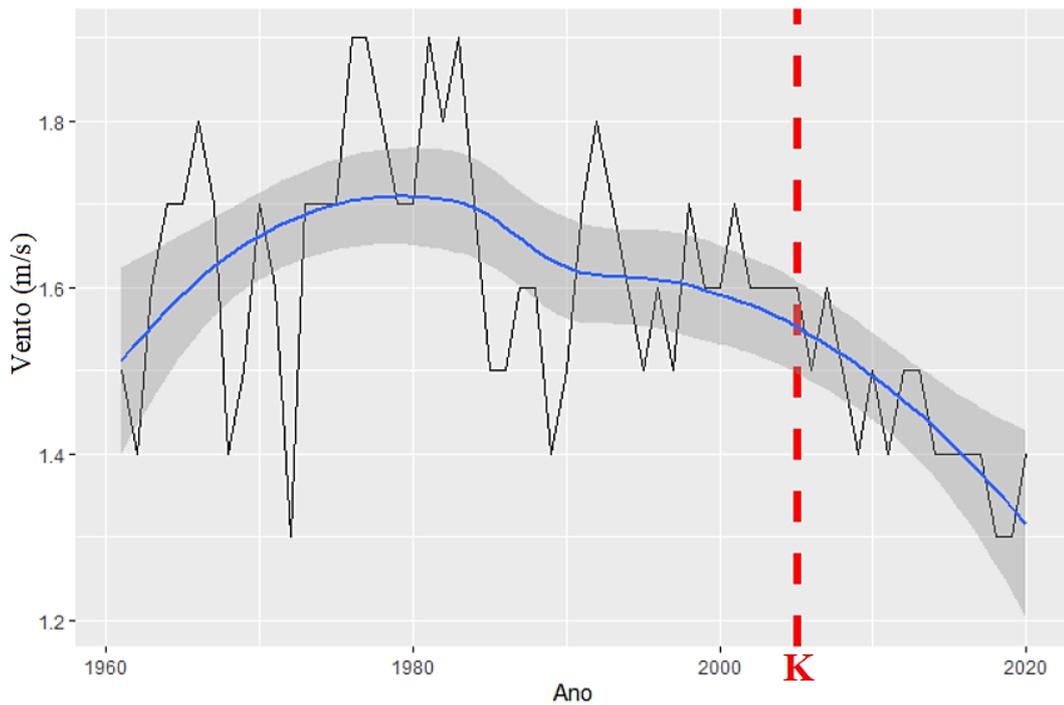
O teste de Pettitt é um teste não paramétrico baseado numa versão do teste de MannWitney, teste U, para estimar o ponto de quebra de uma sequência de variáveis (Pettitt, 1979). Ele é uma alternativa não paramétrica ao teste t de Student, sendo útil quando a distribuição dos dados é desconhecida ou não segue uma distribuição normal, como é o caso de séries temporais de velocidade do vento, que podem comumente ser descritas via distribuição de Weibull (Weibull, 1951). O teste compara as medianas dos grupos em vez das médias, tornando-o robusto a outliers e distribuições assimétricas.

O teste de Pettitt identificou os pontos de mudanças nas séries de velocidade do vento das regiões homogêneas, de acordo com o parâmetro K, relativo ao número da ordem de mudança associado ao respectivo ano na série temporal, e o p-valor dessa mudança relativa ao ano de inflexão observado ao final da série.

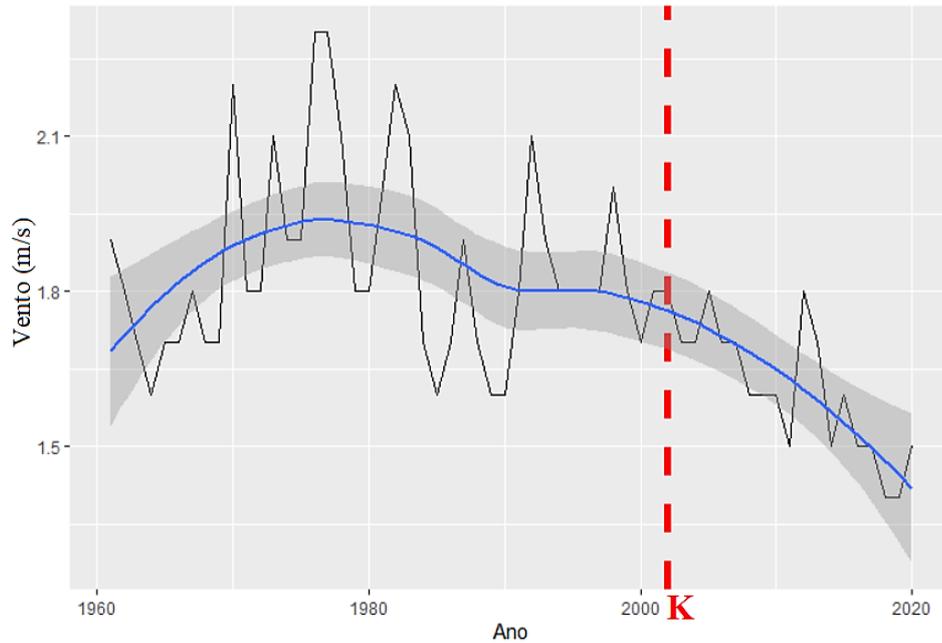
Para auxiliar na visualização dessas quebras estruturais, em uma avaliação anual, foram identificados pontos de mudança para todos os grupos homogêneos. Para o G1 (Figura 17), foi identificado o ponto 45, correspondente ao ano de 2005 como o de inflexão no comportamento da série temporal, indicando decréscimo sistemático das velocidades do vento a partir desse ano. Para o grupo G2 (Figura 18), o ponto 42 que é relativo ao ano de 2002 marca a mudança no padrão de velocidade do vento, com decréscimo a partir de então nos valores observados. Para o G3 (Figura 19), o ponto 47 que corresponde ao ano de 2007 marca o decréscimo sistemático das velocidades do vento, que em todo período anterior, de 1961 a 2006, apresentou forte variabilidade anual, porém seguindo um padrão médio.

Para o G4 (Figura 20), o ano de 2002 relativo ao ponto 41 da série representa o início da mudança sistemática no padrão médio da velocidade do vento, que passa a decrescer sistematicamente a partir desse ano, de forma contrária a leve tendência de aumento que foi verificada de 1961 até aproximadamente 1985, quando então passa a decrescer atingindo o máximo de inflexão em 2001. Comportamento similar ao do G4 é observado para o G5 (Figura 21), apenas com a diferença de que o máximo de inflexão na série é observado no ponto 45,

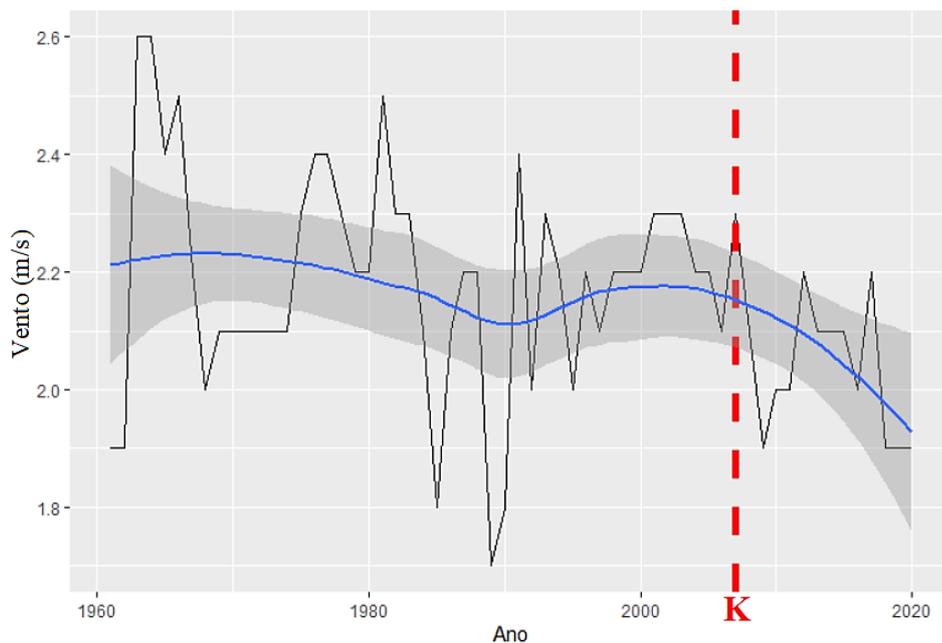
relativo ao ano de 2005, quando a redução média anual dos valores da velocidade do vento torna-se constante. Por fim, o G6 (Figura 22) apresenta comportamento distinto dos demais grupos, observando-se uma quebra estrutural mais precoce, no ponto 22, relativo ao ano de 1982, quando os valores de velocidade do vento passam a ser sistematicamente menores até o ano de 1990, aproximadamente, experimentando desse ano até aproximadamente o ano 2000 uma leve tendência de aumento, e então experimenta quedas constantes da velocidade do vento novamente, e mais notáveis, a partir do ano de 2005.



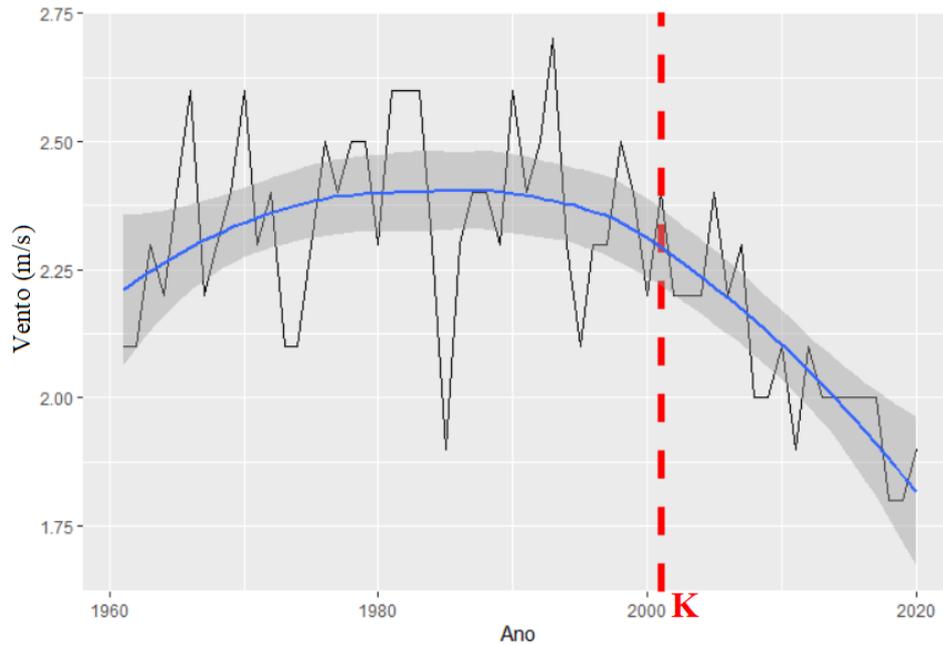
**Figura 17.** Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G1, no período 1961-2020, ano de 2005 como o de inflexão no comportamento da série temporal. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.



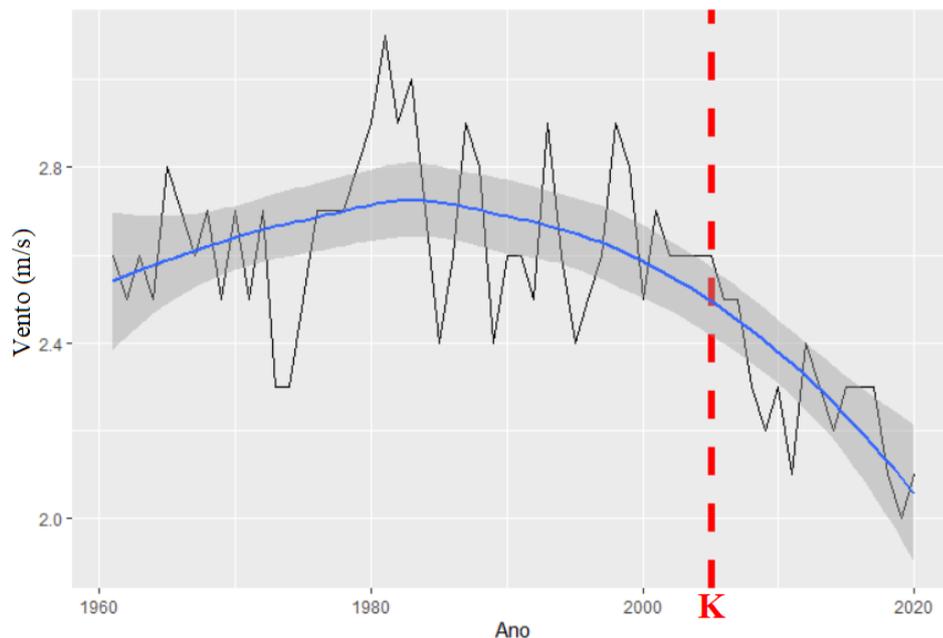
**Figura 18.** Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G2, no período 1961-2020, o ponto 42 que é relativo ao ano de 2002 marca a mudança no padrão de velocidade do vento. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.



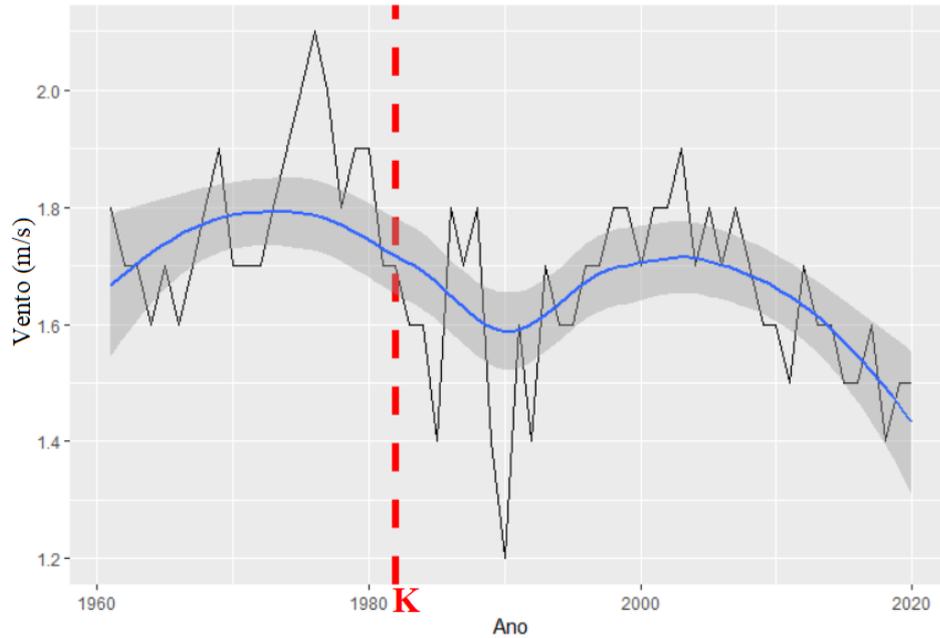
**Figura 19.** Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G3, no período 1961-2020, corresponde ao ano de 2007 como marca do decréscimo sistemático das velocidades do vento. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.



**Figura 20.** Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G4, no período 1961-2020, quando então passa a decrescer atingindo o máximo de inflexão em 2001. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.



**Figura 21.** Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G5, no período 1961-2020, quando então passa a decrescer atingindo o máximo de inflexão em 2005. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.



**Figura 22.** Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média anual de velocidade do vento do G6, no período 1961-2020, o G6 apresenta comportamento distinto dos demais grupos, observando-se uma quebra estrutural mais precoce, no ponto 22, relativo ao ano de 1982. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de  $\pm 2,5$  desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste.

É importante destacar os períodos de quebra abrupta das velocidades observadas nos grupos com características homogêneas, dados esses obtidos através da utilização do Teste de Pettitt. Essas informações são importantes na construção de projetos técnicos de perfis eólicos visando a geração de energia elétrica, contribuindo na diversificação da matriz energética nacional.

## 6. DISCUSSÃO

A maior parte das pesquisas realizadas sobre a velocidade do vento no NEB concentra-se na avaliação de mudanças nos ventos de superfície em relação a produção de energia eólica, no presente e no futuro (Lucena et al. 2010; Pereira et al. 2013; Santos e Silva 2013; Pes et al. 2017).

Lucena et al. (2010) mostraram que a produção futura de energia eólica deve aumentar para o litoral e norte do Brasil até o final do século 21 com base nos cenários de emissões e cobertura atual da terra do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), usando o modelo climático HadCM3 (Gordon et al. 2000). Pereira et al. (2013) encontrou resultados semelhantes com o mesmo modelo, com projeção de aumento da energia eólica até o final do século XXI.

No entanto, na contramão dos resultados obtidos por esses autores para cenários futuros, uma análise para os dados observados de 1960 a 2007 também por Pereira et al. (2013), para 15 estações meteorológicas mostrou que 11 desse total apresentava tendências lineares decrescentes da velocidade do vento nesse período. Este resultado é similar aos encontrados nessa pesquisa, uma vez que se observou tendência de redução na velocidade do vento em seis regiões homogêneas do NEB no período 1961-2020.

Mais um trabalho que apresentou resultados semelhantes à nossa pesquisa, foi o de Santos e Silva (2013), que mostrou haver tendência negativa de velocidade dos ventos no NEB no período 1986-2011. Vale salientar que mostramos haver um ponto de inflexão, em cinco das seis regiões homogêneas analisadas para o NEB, entre 2001 a 2007, quando a velocidade do vento passa a apresentar uma queda sistemática ano a ano de suas velocidades médias anuais.

Lima et al. (2024), analisaram mudanças em dados diários de velocidade do vento de 1961 a 2020 de 54 estações meteorológicas no Brasil, separadas de acordo com a região de origem. Assim como em nosso estudo, os autores avaliaram duas normais climatológicas distintas desse período, 1961-1990 e 1991-2020, e encontraram tendências negativas de estações localizadas no oeste e litoral do NEB, concordando com nossos resultados, porém encontraram tendências positivas, ou seja, de aumento na velocidade dos ventos no interior do NEB, em seu setor semiárido, discordando de nossos resultados. Vale salientar que nesse estudo, a amostra de estações no NEB foi de apenas 11 estações, e que essas precisaram passar por procedimentos de preenchimento de falhas, o que inevitavelmente pode alterar características das séries temporais. Além do mais, a análise não se deu para valores próximos

a superfície, pois os dados foram extrapolados para a altura de 100m acima da altitude da estação, visando concordância com alturas médias de torres de geração de energia eólica.

Há em termos globais, um consenso de que a velocidade do vento à superfície vem diminuindo nas últimas décadas em todo o globo. McVicar et al. (2012) mostrou que 82% de todos os estudos sobre tendências do vento publicados até 2012 indicavam declínio na velocidade média anual do vento em superfície. Porém, o debate científico seguiu concentrado em identificar os motivos desses declínios identificados em tantas partes diferentes do planeta (Vautard et al. 2010; Bichet et al. 2012; Yang et al. 2012; Chen et al. 2013; Lin et al. 2013; Lin et al. 2013; You et al. 2014; Azorin-Molina et al. 2014; Romanić et al. 2015).

Estudos atribuem as tendências decrescentes devido aos processos de urbanização, que modificam as condições normais de fluxo próximo de estações meteorológicas, devido a barreiras impostas principalmente por áreas construídas, que modificam a cobertura natural do solo. Li et al. (2011) mostraram, por exemplo, que a urbanização contribuiu para um declínio em torno de 20% da velocidade do vento entre 1960 a 2008 em Pequim, na China.

## 7. CONCLUSÕES

A velocidade do vento no NEB é mais fraca no primeiro semestre do ano, com média superior a 2 m/s em partes do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, e 2,5 m/s no extremo nordeste do Rio Grande do Norte. No segundo semestre do ano, as velocidades são bem maiores nessas áreas, atingindo valores médios diários próximos a 4 m/s no Rio Grande do Norte e na Paraíba.

No entanto, a diferença entre as normais climatológicas para 1991-2020 e 1961-1990 mostrou uma redução na velocidade do vento nos últimos 30 anos na parte central do Rio Grande do Norte, em torno de 0,3 m/s, e mais acentuada no leste do NEB entre Alagoas e sul da Bahia, atingindo mais de 0,5 m/s na divisa entre os estados de Alagoas e Sergipe. A tendência oposta, de aumento da velocidade dos ventos, foi observada entre os estados da Paraíba e Pernambuco, sul do Piauí, noroeste da Bahia e noroeste do Maranhão.

A análise de cluster identificou seis regiões, ou grupos homogêneos, de velocidade do vento no NEB. As seis regiões têm particularidades próprias, sendo que os grupos 4 e 5 apresentam a maior intensidade de velocidade do vento ao longo do ano. Não por acaso, essas regiões estão localizadas nas porções norte e leste do NEB, onde os ventos mantêm essa característica e são mais intensos no segundo semestre do ano.

A análise de tendências mostrou sinais de redução da velocidade do vento em todas as regiões homogêneas no segundo período dos últimos 60 anos: 1991-2020. O teste de Pettitt mostrou que o ponto de inflexão na velocidade média anual dos ventos nas regiões homogêneas 1 a 5 se deu entre os anos de 2001 a 2007, enquanto na região homogênea 6 isso ocorreu mais cedo, no ano de 1982.

Este resultado é importante para direcionar estudos mais focados na estimativa de ventos na altitude de torres de geração de energia comumente instaladas em diversos pontos do NEB. Diante dos resultados obtidos e da análise do que existe na literatura, podemos expandir as linhas de estudo para obter parâmetros qualitativos dos perfis homogêneos, a análise a nível de todo o território brasileiro das variáveis observadas, bem como o estudo da ação do homem no impacto da variação das velocidades observadas nos 6 grupos regionais com dados homogêneos.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABEEÓLICA.** Associação Brasileira de Energia Eólica. 2017. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>.

ADAMI, V.S.; JÚNIOR, J.A.V.A.; SELKITTO, M.A. Regional industrial policy in the wind energy sector: The case of the State of Rio Grande do Sul, Brazil. **Energy Policy**, v. 111, p. 18–27, 2017.

ALCÂNTARA, C.R.; SOUZA, E.P. Teoria para o trabalho de expansão aplicada às brisas do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.4, p. 423-435, 2009.

ALMEIDA, L.; SERRA, J.C.V. Hydrological models, types and applications used more. **Revista da FAE**, v. 20, p. 129 - 137, 2017.

ALVALA, R.C.; CUNHA, A.P.M.A.; BRITO, S.S.B.; SELUCHI, M.E.; MARENGO, J.A.; MORAES, O.L.L.; CARVALHO, M.A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, p. 1-15, 2019.

ANDRÉ, R.G.B.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; FERRAUDO, A.S. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no estado do rio de janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 501-509, 2008.

ANJOS, M.; LOPES, A. Sea breeze front identification on the northeastern coast of Brazil and its implications for meteorological conditions in the Sergipe region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, p. 2151–2165, 2019.

ARAÚJO, J. C. H. Entre expropriações e resistências: A implementação de parques eólicos na zona costeira do Ceará, Brasil. **Cadernos do CEAS**, n. 236, p. 327-346, 2016.

AZORIN-MOLINA, C.; VICENTE-SERRANO, S.M.; MCVICAR, T.R.; JEREZ, S.; SANCHEZ-LORENZO, A.; LÓPEZ-MORENO, J-I.; REVUELTO, J.; TRIGO, R.M.; LOPEZ-BUSTINS, J.A.; ESPÍRITO-SANTO, F. Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961–2011. **Journal of Climate**, v. 27, p. 3692–3712, 2014.

BARROS, A. M. L. **Avaliação da precipitação como variável exógena na previsão de geração eólica de curto prazo de uma central eólica no Ceará**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 192 p, 2017.

BICHET, A.; WILD, M.; FOLINI, D.; SCHÄR, C. Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model. **Geophysical Research Letters**, v. 39, L11701, 2012.

BLAIN, G.C. Applying the standardized precipitation index concept to ten-day period series of the difference between precipitation and potential evapotranspiration. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 234-245, 2011.

CARNEIRO, T. C.; CARVALHO, P. C. M. de. Caracterização de potencial eólico: estudo de caso para Maracanaú (CE), Petrolina (PE) e Parnaíba (PI). **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 1, 2015.

CARVALHO, M.; OYAMA, M. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: Aspecto observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p. 305 - 316, 2013.

CAVALCANTI, Iracema FA. **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de textos, 2016.

CHEN, L.; LI, D.; PRYOR, S.C. Wind speed trends over China: Quantifying the magnitude and assessing causality. **International Journal of Climatology**, v. 33, p. 2579–2590, 2013.

CORREIA, A.A.; ARAGÃO, M.R.S.; BRAGA, C.C. Padrões de variabilidade temporal das componentes do vento à superfície no Nordeste do Brasil. **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2000.

COSTA, R.L.; BAPTISTA, G.M.M; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; DA ROCHA JÚNIOR, R.L.; SALVADOR, M.A.; HERDIES, D.L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, p. 100254, 2020.

DA ROCHA JÚNIOR, R.L.; DOS SANTOS SILVA, F.D.; LISBOA COSTA, R.; BARROS GOMES, H.; HERDIES, D.L.; RODRIGUES DA SILVA, V.P.; CANDIDO XAVIER, A. Analysis of the Space-Temporal Trends of Wet Conditions in the Different Rainy Seasons of Brazilian Northeast by Quantile Regression and Bootstrap Test. **Geosciences**, v. 9, p. 457, 2019.

DA ROCHA JÚNIOR, R.L.; DOS SANTOS SILVA, F.D.; LISBOA COSTA, R.; BARROS GOMES, H.; CAVALCANTE PINTO, D.D.; HERDIES, D.L. Bivariate Assessment of Drought Return Periods and Frequency in Brazilian Northeast Using Joint Distribution by Copula Method. **Geosciences**, v. 10, p. 135, 2020.

DA SILVA, M.N.A.; PESSOA, F.C.L.; SILVEIRA, R.N.P.O.; ROCHA, G.S.; MESQUITA, D. A. Determinação da homogeneidade e tendência das precipitações na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 665-675. 2018.

DA SILVA, P.E.; SILVA, C.M.S.; SPYRIDES, M.H.C.; ANDRADE, L.M.B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 39, p. 1-17, 2018.

DANIELSON, J.; GESCH, D. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED 2010). USGS, p. 2011–1073. 2011.

DE OLIVEIRA, S. M.; STOSIC, T.; STOSIC, B. D. Long-term correlations in hourly wind speed records in Pernambuco, Brazil. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 391, n. 4, p. 1546–1552, 2012.

DINIZ, F.A.; RAMOS, A.M.; REBELLO, E.R.G. Brazilian climate normals for 1981–2010. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 131–143, 2018.

DO NASCIMENTO, C.H.; LUCIO, P.S.; GOMES, O.M.; JUNIOR, J.B.V.L. Predição de velocidade do vento em regiões do Nordeste brasileiro através de regressão linear e não linear para fins de geração eólica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 927–939, 2016.

DOS SANTOS, C.A.C.; OLIVEIRA, V.G.D. Trends in Extreme Climate Indices for Pará State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 13-24, 2017.

DOS SANTOS, C.A.C.; SATYAMURTY, P.; SANTOS, E.M. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. **Acta Amazonica**, v. 42, p. 329-336, 2012.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; Cavalcante, L.V.C. Impacts of Tropical Cyclones in the Northern Atlantic on Adverse Phenomena Formation in Northeastern Brazil. Current Topics in Tropical Cyclone Research [Working Title]. 1ed.London, United Kingdom: **IntechOpen**, p. 1-16, 2019.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; SILVEIRA, M.H.S.; PONTES DA SILVA, B.F.; AMIRANASHVILI, A.G. Mesoscale Convective Complexes on the Northeastern Coast of Brazil. **Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue B: Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma**, v. 13B, p. 36-49, 2009.

FEITOSA, E.A.N.; ROHATGI, J.; LIZCANO, G. WANEB - Wind Atlas for the Northeast of Brazil. Brasília. **ANEEL**, 50p, 1998.

FEITOSA, E.A.N.; SILVA, G.R.; PEREIRA, A.L.; VELEDA, D.E.A.; SILVAS, C.C. Panorama do potencial eólico do Brasil. Brasília. **ANEEL**, 68p, 2002.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FREITAS, I.G.F.; GOMES, H.B.; PEÑA, M.; MITSOPOULOS, P.; NOVA, T.S.V.; SILVA, K.M.R.; CALHEIROS, A.J.P. Evaluation of Wind and Wave Estimates from CMEMS Reanalysis for Brazil's Offshore Energy Resource Assessment. **Wind**, v. 2, p. 586-598, 2022.

GARCIA, A.; TORRES, J.L.; PRIETO, E.; DE FRANCISCO, A. Fitting wind speed distributions: A case study. **Solar Energy**, v. 62, n. 2, p. 139-144, 1998.

GIANNINI, A.; CHIANG, J.C.H.; CANE, M.A.; KUSHNIR, Y.; SEAGER, R. The ENSO teleconnection to the tropical Atlantic ocean: Contributions of the remote and local SSTs to rainfall variability in the tropical Americas, **Journal of Climate**, v. 14, n. 24, p. 4530–4544, 2001.

**GWEC**, G.W.E.C. Global Wind Energy Outlook. [S.l.]: Brussels, 2017.

**GWEC**, G.W.E.C. Global Wind Report 2023. [S.l.]: Brussels, 2023.

HASTENRATH, S. Prediction of Northeast Brazil Rainfall Anomalies. **Journal of Climate**, v. 3, n. 893–904, 1990.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamic of Climatic Hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 110, p. 411-425, 1977.

HELSEL, D.; HIRSCH, R. **Statistical Methods in Water Resources**. US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations Book, v. 4, Chapter A3, 522 p, 2002.

HERDIES, D.L.; Silva, F.D.S.; GOMES, H.B.; SILVA, M.C.L.; GOMES, H.B.; COSTA, R.L.; LINS, M.C.C.; REIS, J.S.; KUBOTA, P.Y.; SOUZA, D.C.; MELO, M.L.D.; MARIANO, G.L. Evaluation of Surface Data Simulation Performance with the Brazilian Global Atmospheric Model (BAM). **Atmosphere**, v. 14, p. 125, 2023.

HERVADA-SALA, C.; JARAUTA-BRAGULAT, E. A program to perform Ward's clustering method on several regionalized variables. **Computers and Geosciences**, v. 30, p. 881-886, 2004.

HOUNSOU-GBO, G.A.; SERVAIN, J.; ARAUJO, M.; CANIAUX, G.; BOURLÈS, B.; FONTENELE, D.; MARTINS, E.S.P.R. SST indexes in the Tropical South Atlantic for forecasting rainy seasons in northeast Brazil. **Atmosphere**, v. 10, p. 335, 2019.

JARDIM, J.P.; FERREIRA, A.P.F.; PIUZANA, D. CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA: proposta da construção de um globo terrestre como prática de ensino. **Revista Eletrônica Geoaraguaia**, v. 6, n.1, p. 57 - 70, 2016.

KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. Upper Tropospheric Cyclonic Vortices in the Tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, p. 538-551, 1981.

KULIKOVA, I.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CORDEIRO, E.S. Sea Surface Temperature Anomaly and Precipitation Distribution in the Alagoas State of the Brazilian Northeast. **Natural Science**, v. 6, n. 14, 2014.

LAKATOS, L.; HEVESSY, G.; KOVÁCS, J. Advantages and disadvantages of solar energy and wind-power utilization. **World Futures**, v. 67, p. 395-408, 2011.

LI, X.; MITSOPOULOS, P.; YIN, Y.; PEÑA, M.; SARAL, A. Wind and Significant Wave Height for Offshore Wind Energy Applications in the New England Region. **Remote Sensing**, v. 13, p. 57, 2021.

LI, Z.; YAN, Z.; TU, K.; LIU, W.; WANG, Y. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 28, p. 408–420, 2011.

LIMA, G.C.; RODRIGUES, D.T.; SANTOS E SILVA, C.M.; COSTA, P.C.S. Evolution of wind speed observed in Brazil between 1961 and 2020. **International Journal of Climatology**, v. 44, n. 6, p. 1932-1954, 2024.

LIN, C.; YANG, K.; QIN, J.; FU, R. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960. **Journal of Climate**, v. 26, p. 2891–2903, 2013.

LIRA, M.A.T.; NETO, J.M.M.; LOIOLA, J.V.L.; SILVA, E.M.; ALVES, J.M.B. Caracterização do Regime de Ventos no Piauí Para o Aproveitamento de Energia Eólica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 77 – 88, 2017.

LIU, G.; WANG, C.; QIN, H.; FU, J.; SHEN, Q. A Novel Hybrid Machine Learning Model for Wind Speed Probabilistic Forecasting. **Energies**, v. 15, p. 6942, 2022.

LUCAS, E.W.M.; DOS SANTOS SILVA, F.D.; DE SOUZA, F.D.A.S.; PINTO, D.D.C.; GOMES, H.B.; GOMES, H.B.; LINS, M.C.C.; HERDIES, D.L. Regionalization of Climate Change Simulations for the Assessment of Impacts on Precipitation, Flow Rate and Electricity Generation in the Xingu River Basin in the Brazilian Amazon. **Energies**, v. 15, p. 7698, 2022.

LUCENA, A.F.P.; SZKLO, A.S.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R.M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, p. 904–912, 2010.

LYRA, G.B.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; ZERI, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 3546-3558, 2014.

MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P.M.A.; NOVRE, C.A.; RIBEIRO NETO, G.G.; MAGALHÃES, A.R.; TORRES, R.R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L.M.; CUARTAS, L.A.; DEUSDARÁ, K.R.L.; ÁLVALA, R.C.S. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, v. 103, p. 2589–2611, 2020.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.

MCVICAR, T.R.; RODERICK, M.L.; DONOHUE, R.J.; LI, L.T.; VAN NIEL, T.G.; THOMAS, A.; GRIESER, J.; JHAJHARIA, D.; HIMRI, Y.; MAHOWALD, N.M.; MESCHERSKAYA, A.V.; KRUGER, A.C.; REHMAN, S.; DIMPASHOH, Y. Global review

and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 417, p. 182–205, 2012.

MEDEIROS, F.J.; OLIVEIRA, C.P.; SANTOS E SILVA, C.M.; ARAÚJO, J.M. Numerical simulation of the circulation and tropical teleconnection mechanisms of a severe drought event (2012–2016) in Northeastern Brazil. **Climate Dynamics**, v, 54, p. 4043–4057, 2020.

MIMMACK, G.M.; MASON, S.J.; GALPIN, J.S. Choice of distance matrices in cluster analysis: defining regions. **Journal of Climate**, v. 14, p. 2790–2797, 2001.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, p. 1-10, 2002.

MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory and Numerical Experiments with a General Circulation Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 2653–2675, 1981.

**NEOENERGIA**: Ventos do Nordeste. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt/inicio>, (acessado em 20 de junho de 2023).

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variation of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2464–2479, 1996.

OLIVEIRA, C.P.; KAYANO, M.T. EFEITOS DO ENOS NA PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL ANTES E DEPOIS de 1977. **Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española**. Edição 30, 2020.

OLIVEIRA, J.; COSTA, A. Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o Nordeste brasileiro utilizando o RAMS: Os casos de 1973-1974 e 1982-1983. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 53–66, 2011.

**Operador Nacional do Sistema Elétrico do Brasil (ONS)**. Histórico de Operação. Available online: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/> (acessado em 20 de junho de 2023).

ORTIZ, G.P.; KAMPEL, M. Potencial de Energia Eólica Offshore na Margem do Brasil. V **Simpósio Brasileiro de Oceanografia**: Santos, Brasil, 2011.

PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H.; DOS SANTOS, C.A.C. Evaluation of the Performance of SM2RAIN-Derived Rainfall Products over Brazil. **Remote Sensing**, v. 11, p. 1113, 2019.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; PES, M.P.; SEGUNDO, E.I.D.; LYRA, A.D. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013.

PEREYRA-CASTRO, K.; CAETANO, E.; MARTÍNEZ-ALVARADO, O.; QUINTANILLA-MONTOYA, A.L. Wind and Wind Power Ramp Variability over Northern Mexico. **Atmosphere**, v. 11, n. 12, p. 1281, 2020.

PES, M.P.; PEREIRA, E.B.; MARENGO, J.A.; MARTINS, F.R.; HEINEMAN, D.; SCHMIDT, M. Climate trends on the extreme winds in Brazil. **Renewable Energy**, v. 109, p. 110–120, 2017.

PETTITTT, A. N. A non-parametric approach to the change point problem. **Applied Statistics**, v. 28, p. 126-135, 1979.

POHLERT, T. **Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection** (R package version 1.1.2). Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=trend>, 2020.

**RAÍZEN**: O futuro da energia é renovável. Por: Times de Energia e Sustentabilidade da Raízen, 27/05/2022, (acessado em 20 de junho de 2023).

ROCHA JÚNIOR, R.L.; SILVA, F.D.S.; COSTA, R.L.; GOMES, H.B.; GOMES, H.B.; SILVA, M.C.L.; PINTO, D.D.C.; HERDIES, D.L.; CABRAL JÚNIOR, J.B.; PITA-DÍAZ, O. Mudança

de Longo Prazo e Regionalização da Evapotranspiração de Referência no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 891-902, 2021.

RODRIGUES, L.R.L.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Adverse Meteorological Phenomena Associated with Low Level Baric Troughs in the Alagoas State, Brazil, in 2003. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, p. 204-209, 2010.

RODRIGUES, R.R.; MCPHADEN, M.J. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 3, p. 1012–1018, 2014.

ROMANIĆ, D.; ĆURIĆ, M.; JOVIČIĆ, I.; LOMPAR, M. Long-term trends of the ‘Koshava’ wind during the period 1949–2010. **International Journal of Climatology**, v. 35, p. 288–302, 2015.

SALVIANO, M.F.; GROppo, J.D.; PELLEGINO, G.Q. Analise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 64-73, 2016.

SANTANA, L. V. R.; STOSIC, T.; DEZOTTI, C. H.; MOURA, G. B. de A.; ARAÚJO, L. H. G. D. de; SILVA, A. S. A. da. Spatial analyses of wind speed in the North-Brazil with data from ERA-40. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 3, p. 414–432, 2015.

SANTOS, A.T.S.; SILVA, C.M.S. Seasonality, interannual variability, and linear tendency of wind speeds in the northeast Brazil from 1986 to 2011. **The Scientific World Journal**, v. 3, p. 490857, 2013.

SANTOS, E.B.; LUCIO, P.S.; SANTOS E SILVA, C.M. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. **Atmospheric Science Letters**, v. 16, p. 185-192, 2015.

SCHNEIDER, T.; BISCHOF, T.; HAUG, G. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **Nature**, v. 513, n. 7516, p. 45–53, 2014.

SILVA, B. B.; ALVES, J.J.A.; CAVALCANTI, E.; VENTURA, E. Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 189–202, 2004.

SILVA, B.B.; ALVES, J.J.A.; CAVALCANTI, E.P.; DANTAS, R.T. Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 431-439, 2002.

SILVA, J.S.; CABRAL JÚNIOR, J.B.; RODRIGUES, D.T.; Silva, F.D.S. Climatology and significant trends in air temperature in Alagoas, Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 151, p. 1-20, 2023.

SILVA, J.S.S.; SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil. **Building and Environment**, v. 136, p. 279-292, 2018.

UTIDA, G.; CRUZ, F.W.; ETOURNEAU, J.; BOULOUBASSI, I.; Schefuß, E.; VUILLE, M.; NOVELLO, V.F.; PRADO, L.F.; Sifeddine, A.; KLEIN, V.; ZULAR, A.; VIANA, J.C.C.; TURCQ, B. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1698, 2019.

VAUTARD, R.; CATTIAUX, J.; YIOU, P.; THÉPAUT, J-N.; CIAIS, P. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. **Nature Geoscience**, v. 3, p. 756–761, 2010.

WARD JR.; J.H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244, 1963.

WEIBULL, W. A. Statistical Distribution Function of Wide Applicability. **Journal of Applied Mechanics**, v. 18, p. 293-297, 1951.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644–2659, 2016.

XAVIER, A.C.; SCANLON, B.R.; KING, C.W.; ALVES, A.I. New Improved Brazilian Daily Weather Gridded Data (1961-2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022.

XAVIER, A.F.S.; DIAS, M.A.F.S.; DIAS, P.L.S.; XAVIER, T.M.B.S. Interrelações Entre Eventos ENOS (ENSO), a ZCIT (ITCZ) no Atlântico e a Chuva nas Bacias Hidrográficas do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 111–126, 2003.

YAN, G.; QI, F.; WEI, L.; AIGANG, L.; YU, W.; JING, Y.; AIFANG, C.; YAMIN, W.; YUBO, S.; QIANQIAN, M. Changes of daily climate extremes in Loess Plateau during 1960–2013. **Quaternary International**, v. 371, p. 5-21. 2015.

YANG, X.; LI, Z.X.; FENG, Q.; HE, Y.Q.; AN, W.L.; ZHANG, W.; CAO, W.H.; YU, T.F.; WANG, Y.M.; THEAKSTONE, W. The decreasing wind speed in southwestern China during 1969–2009 and possible causes. **Quaternary International**, v. 263, p. 71–84, 2012.

YOU, Q.; FRAEDRICH, K.; MIN, J.; KANG, S.; ZHU, X.; PEPINE, N.; ZHANGA, L. Observed surface wind speed in the Tibetan Plateau since 1980 and its physical causes. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 1873–1882, 2014.