



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA  
CURSO DE OCEANOGRAFIA

THAIS TEIXEIRA GAVA

**VARIABILIDADE DOS VENTOS EM SUPERFÍCIE NA REGIÃO DA LAGOA  
DOS PATOS (RS) EM ANOS DE ENOS**

SÃO LUÍS

2023

THAIS TEIXEIRA GAVA

**VARIABILIDADE DOS VENTOS EM SUPERFÍCIE NA REGIÃO DA LAGOA  
DOS PATOS (RS) EM ANOS DE ENOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Oceanografia da  
Universidade Federal do Maranhão para a obtenção  
de Grau de Bacharel em Oceanografia.

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Cláudia Klose Parise.

SÃO LUÍS

2023

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Teixeira Gava, Thais.

VARIABILIDADE DOS VENTOS EM SUPERFÍCIE NA REGIÃO DA  
LAGOA DOS PATOS RS EM ANOS DE ENOS / Thais Teixeira Gava.  
- 2023.

51 f.

Orientador(a): Cláudia Klose Parise.

Monografia (Graduação) - Curso de Oceanografia,  
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

1. El Niño. 2. La Niña. 3. Mudanças climáticas. 4.  
Praia do Cassino. I. Klose Parise, Cláudia. II. Título.

THAIS TEIXEIRA GAVA

**VARIABILIDADE DOS VENTOS EM SUPERFÍCIE NA REGIÃO DA LAGOA  
DOS PATOS (RS) EM ANOS DE ENOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Oceanografia da  
Universidade Federal do Maranhão para a obtenção  
de Grau de Bacharel em Oceanografia.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cláudia Klose Parise.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cláudia Klose Parise

**Universidade Federal do Maranhão (UFMA)**

**Orientadora**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Leonardo Gonçalves de Lima

**Universidade Federal do Maranhão (UFMA)**

**Membro interno**

---

Me. Pablo Dias da Silva

**Universidade Federal do Rio Grande (FURG)**

**Membro externo**

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos expressando minha gratidão a você, Thais Teixeira Gava. Nenhum trajeto se mostrou tão desejado e complicado como esse, e mesmo assim, você perseverou. Então, da pessoa que tinha mais dificuldade em reconhecer seu esforço, PARABÉNS garota. Você finalmente conseguiu!

Também sou grata a alguma divindade que, de algum lugar, me ajudou a iniciar e concluir esta trajetória. Aos meus pais e minha vizinha Lourdes, que não poderiam estar fora deste momento, mesmo sem compreender completamente o que faço, sempre apoiaram esse passarinho a voar por este Brasilão. Obrigada por me fazerem alcançar lugares onde vocês não puderam chegar. Às minhas irmãs Tainara e Tamires, vocês sempre me apoiaram, mesmo à distância. Ao meu primo João, sem você, isso não passaria de um sonho. Obrigada por todo o apoio e por ACREDITAR sempre em mim. Eu amo demais vocês!!

Obrigada, professora Cláudia. Caso você não saiba, foi você a primeira pessoa que me fez ter certeza de que amo a oceanografia. Eu me inspirei em você ao ver essa mulher tão inteligente e empolgada dando aula. Em toda a minha trajetória acadêmica, você foi a pessoa mais humana com quem pude trabalhar. Muito obrigada mesmo por acreditar em mim, mesmo quando eu duvidei.

Agora, agradeço à minha segunda Cláudia (psicóloga) que também acreditou em mim e me ajudou a enfrentar os obstáculos que surgiram. Você foi essencial em minha trajetória.

Não posso deixar de agradecer às minhas primeiras amigas da UFMA, Alana e Kissia. Vocês estarão sempre comigo. Pessoas como Maria Clara, Lilli, Dani, Sakamoto, Andressa, Bruna, Anderson, Leo, Alaídes, Rivaldo, Ana Paula e Iarly entre outros que foram essenciais nessa trajetória. Obrigada aos meus colegas do Laclima que sempre estiveram dispostos a auxiliar, e ao Pablo que me auxiliou muitas vezes durante esse processo. Também agradeço a tantas outras pessoas que tive o prazer de conhecer na Ilha do Amor. Vocês me fizeram sentir mais acolhida.

E, por último, mas não menos importante, obrigada Jair, por toda a ajuda e apoio nesses últimos dias de prazo. E o meu grande amor, Ivana, você e sua irmã (Matilda) foram extremamente importantes. Eu amo vocês!

*“Que inapropiado llamar Tierra a este planeta, cuando es evidente que debería llamarse Océano.”*

Arthur C. Clark

## RESUMO

O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno climático acoplado que apresenta duas fases: El Niño ou fase quente e La Niña ou fase fria, que afetam a variabilidade oceânica e climática globalmente, causando alterações nos ecossistemas e sociedade. No Brasil, a La Niña resulta em diminuição na temperatura do ar e na precipitação nas regiões Sul e Sudeste e aumento das chuvas no Nordeste, enquanto o El Niño causa aumento de temperatura do ar e precipitação no Sul e Sudeste e seca no Nordeste. A Lagoa dos Patos, a maior laguna costeira do mundo, localiza-se na região Sul em um ambiente de micro-marés, sendo influenciada principalmente pela circulação dos ventos e pela descarga fluvial. O objetivo deste estudo é analisar a influência de eventos fortes e moderados do ENOS na dinâmica dos ventos sobre a Lagoa dos Patos, a longo prazo. Foram utilizados dados mensais de temperatura da superfície do mar (TSM) e dados diários de vento a 10 m da base de dados de reanálise ERA5 (1979-2021). O Índice Oceânico do Niño (ION) foi calculado de forma a classificar os eventos de ENOS em relação à fase (El Niño vs La Niña) e intensidade (forte vs moderado). Para El Niño, foram identificados 10 eventos fortes e 5 moderados, incluindo 3 classificados como extremos; para La Niña, foram registrados 5 eventos fortes e 4 moderados. Os dados de reanálise do ERA5 foram validados por meio de comparações com observações *in situ* da boia do SiMCosta, usando coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), Erro Médio Absoluto Relativo (RMAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para os anos de 2019 a 2021. Os resultados indicam correlações fortes entre os dados, com RMSE de 1,765 e RMAE de 0,0584. Com os dados validados, foram realizadas as anomalias de vento em superfície para a região da Lagoa dos Patos durante eventos do ENOS. Este trabalho concluiu que o El Niño forte está associado a anomalias positivas de vento, principalmente na região oceânica. Durante o El Niño moderado, há potencial intensificação da circulação do vento na costa. La Niña forte mostra ventos predominantes de nordeste e sudeste na Lagoa dos Patos. A dinâmica sazonal impacta as anomalias de vento, com destaque para o aumento no quadrante sul no final do verão e início do outono, especialmente durante eventos extremos, que estão relacionados ao El Niño e às alterações na Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), resultando em ventos nordeste predominantes.

**Palavras-chave:** El Niño; La Niña; Mudanças climáticas; Praia do Cassino.

## ABSTRACT

The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is a coupled climatic phenomenon that presents two phases: El Niño or warm phase, and La Niña or cold phase, affecting oceanic and global climatic variability, leading to changes in ecosystems and society. In Brazil, La Niña results in a decrease in air temperature and precipitation in the Southern and Southeastern regions, with increased rainfall in the Northeast. On the other hand, El Niño causes an increase in air temperature and precipitation in the South and Southeast, resulting in drought in the Northeast. The Lagoa dos Patos, the world's largest coastal lagoon, is located in the Southern region in a micro-tidal environment, primarily influenced by wind circulation and river discharge. The objective of this study is to analyze the influence of strong and moderate ENOS events on the wind dynamics over Lagoa dos Patos in the long term. Monthly sea surface temperature (SST) data and daily wind data at 10 m were used from the ERA5 reanalysis database (1979-2021). The Oceanic Niño Index (ONI) was calculated to classify ENOS events based on phase (El Niño vs La Niña) and intensity (strong vs moderate). For El Niño, 10 strong events and 5 moderate events were identified, including 3 classified as extreme; for La Niña, 5 strong events and 4 moderate events were recorded. ERA5 reanalysis data were validated by comparing them with in situ observations from the SiMCosta buoy, using Pearson correlation coefficient ( $r$ ), Relative Mean Absolute Error (RMAE), and Root Mean Square Error (RMSE) for the years 2019 to 2021. The results indicate strong correlations between the data, with an RMSE of 1.765 and RMAE of 0.0584. With the validated data, surface wind anomalies were calculated for the Lagoa dos Patos region during ENOS events. This study concluded that strong El Niño is associated with increases in positive wind anomalies, mainly in the oceanic region. During moderate El Niño, there is the potential for an intensification of wind circulation along the coast. Strong La Niña brings predominant winds from the northeast and southeast to Lagoa dos Patos. Seasonal dynamics impact wind anomalies, notably an increase in the southern quadrant at the end of summer and the beginning of autumn, especially during extreme events, which are related to El Niño and changes in the South Atlantic Subtropical High (SASH), resulting in predominant northeast winds.

**Keywords:** El Niño; La Niña; Climate change; Cassino Beach.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - A imagem à esquerda indica a região do Niño 3.4 localizado no oceano Pacífico. A direita mostra a localização da área de estudo, em destaque, está a estação meteorológica do SiMCosta localizada na Lagoa dos Patos, responsável pela coleta de dados meteoceanográficos .....18
- Figura 2** - Séries temporais (Fevereiro de 2019 a Outubro de 2021) do vento superficial a 10 m simuladas pela reanálise ERA5 (linha preta), medidas pela bóia RS-2 SiMCosta com correção de altura (linha vermelho) e sem correção de altura (linha azul): **(a)** sem filtro; **(b)** com filtro passa-baixa com janela mensal.....25
- Figura 3** - Variação da velocidade do vento a 10 metros (Fevereiro de 2019 a Outubro de 2021) nos quadrantes norte e sul para o ERA5 (a) e a boia do SiMCosta (b)..... 26
- Figura 4** - Histograma direcional do vento a 10 m: **a)** ERA5 e **b)** SiMCosta ..... 27
- Figura 5** – Viés entre as séries temporais do vento a 10 m do ERA5 e SiMCosta..... 28
- Figura 6** - Dispersão entre os dados simulados (ERA5) e os dados medidos (SiMCosta).....29
- Figura 7** - Representação do Índice Oceânico do Niño (ION), calculado a partir das anomalias trimestrais de temperatura da superfície do mar (TSM) obtidas da reanálise ERA5, na região do Niño 3.4, para o período compreendido entre os anos de 1979 a 2021. As linhas pontilhadas indicam os valores de referência para eventos moderados ( $\pm 1,0$ ), enquanto as linhas tracejadas marcam os valores de referência para eventos fortes ( $\pm 1,5$ ). Eventos classificados acima de 2,0 são considerados severos.....30
- Figura 8** – Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de El Niño Forte ocorrido na região do Niño 3.4 entre os anos de 1979 a 2021 compreendendo um total de 10 eventos. .... 33
- Figura 9** - Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de El Niño moderado ocorrido na região do Niño 3.4 entre os anos de 1979 a 2021, compreendendo um total de 5 eventos. ....34

<b>Figura 10</b> - Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de La Niña forte ocorrido na região do Nino 3.4 entre os anos de 1979 a 2021, compreendendo um total de 5 eventos. ....	36
<b>Figura 11</b> - Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de La Niña moderada ocorrido na região do Nino 3.4 entre os anos de 1979 a 2021, compreendendo um total de 4 eventos. ....	37
<b>Figura 12</b> - Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de El Niño Extremo ocorrido na região do Nino 3.4 em 1982.....	39
<b>Figura 13</b> - Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de El Niño Extremo ocorrido na região do Nino 3.4 em 1997 .....	40
<b>Figura 14</b> - Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de El Niño Extremo ocorrido na região do Nino 3.4 em 2015 .....	41

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - A imagem à direita oferece uma visão geral da área de estudo. À esquerda, em destaque vermelho, está a estação meteorológica do SiMCosta localizada na Lagoa dos Patos, responsável pela coleta de dados meteoceanográficos.....20
- Tabela 2** - Classificação da intensidade da correlação de Pearson, baseada em Sasaki (2014).....22
- Tabela 3** - Classificação da qualidade do resultado de acordo com os valores de RMAE, baseado por Walstra et al. (2001).....23
- Tabela 4** - RMSE, RMAE e coeficiente de correlação ( $r$ ) entre ERA5 e a bóia do SiMCosta durante os respectivos períodos de medições .....29

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>CDO</b>	<i>Climate Data Operators</i>
<b>ECMWF</b>	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
<b>ENOS</b>	El Niño - Oscilação Sul
<b>ION</b>	Índice Oceânico do Niño
<b>LP</b>	Lagoa dos Patos
<b>NOAA</b>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<b>RMAE</b>	<i>Root Mean Absolute Error</i>
<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Square Error</i>
<b>SiMCosta</b>	Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira
<b>TSM</b>	Temperatura Superficial do Mar

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>06</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>07</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>3 DADOS E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
3.2 DADOS CLIMÁTICOS .....	19
3.2.1 Cálculo do Índice Oceânico do Niño.....	19
3.2.2 Construção de compostos de vento em superfície para os anos de ENOS.....	20
3.3 ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA REANÁLISE DO ERA5.....	21
3.4 PADRONIZAÇÃO DA ALTURA DOS DADOS DE VENTO .....	23
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>24</b>
4.1 VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS DE REANÁLISE DE VENTO.....	24
4.1.1 Vento superficial a 10 m.....	24
4.1.2 Diferença entre os dados simulados e medidos .....	27
4.1.3 Correlação, Dispersão, Erro Quadrático Médio e Erro Médio Absoluto Quadrático entre os dados simulados e medidos .....	28
4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS FASES E INTENSIDADES DOS EVENTOS DE ENOS.....	30
4.3 ANOMALIAS DE VENTO EM SUPERFÍCIE SOBRE A LAGOA DOS PATOS PARA AS DIFERENTES FASES E INTENSIDADES DO ENOS .....	31
4.4 EVENTOS SEVEROS DE VENDAVAIS .....	38
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, eventos climáticos intensos têm ganhado destaque global, não apenas pela sua força, mas também pelos impactos adversos que geram no meio ambiente e na sociedade (Liu et al., 2023; Ahmed et al., 2023; Burke et al., 2015). Com a tendência crescente da temperatura global, esses fenômenos climáticos extremos estão se tornando cada vez mais proeminentes, conforme ressaltado no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023). Fenômenos de aquecimento global podem aumentar significativamente a probabilidade de impactos prejudiciais das anomalias climáticas, como o El Niño - Oscilação Sul (ENOS) (Alizadeh, 2023; Diaz et al., 2001). Dado que esses eventos englobam amplas trocas de calor entre o oceano e a atmosfera, isso, por sua vez, impacta as temperaturas médias globais (IPCC, 2007).

A alteração climática de 1976-1977, conforme documentada por Trenberth (1990), está associada a transformações significativas na evolução do El Niño, como destacado por Trenberth e Stepaniak (2001). Essa mudança é caracterizada por TSMs geralmente acima do normal no Pacífico equatorial oriental e central, juntamente com uma propensão para El Niños mais prolongados e intensos (IPCC, 2007). Akhsan et al. (2023) também correlacionaram, em seu estudo na região da Indonésia, as mudanças climáticas com o ENOS, destacando a incidência de temperaturas extremas. E em 2023, o Brasil testemunhou diversos fenômenos marcantes, como secas em regiões historicamente chuvosas (Ex: Região Amazônica) e elevados índices pluviométricos em áreas com padrões de chuva mais amenos (Ex: Região Sul do Brasil) (INPE et al., 2023). Sendo esse um cenário influenciado, em grande parte, pelo fenômeno El Niño, evidenciando sua contribuição para as notáveis irregularidades climáticas observadas.

O ENOS ocorre em duas fases, El Niño ou fase quente e La Niña ou fase fria, conhecido por causar um (aquecimento) resfriamento anômalo das águas do Pacífico Equatorial Central-Leste, respectivamente. Esse fenômeno é o principal modo de variabilidade global na escala interanual, alterando os oceanos e o clima, os ecossistemas, a sociedade e, também, a dinâmica dos ventos em diversas regiões do globo (Ropelewsky e Halpert 1987, 1989; Glantz et al. 1991; Fontana, et al., 1997; Annamalai et al. 2005; Izumo et al. 2010; Timmermann et al., 2018; Ubilava e Abdolrahimi 2019).

O Brasil se destaca como uma das áreas mais suscetíveis aos efeitos do fenômeno ENOS na América do Sul (Grimm et al., 2000). Durante os eventos de La Niña, observa-se uma redução

na temperatura atmosférica e na precipitação nas regiões Sul e Sudeste do país, enquanto na região Nordeste é observado um aumento nas chuvas (Araujo et al., 2014). Dentre os episódios de La Niña mais intensos (anomalias abaixo de  $-1,6^{\circ}\text{C}$ ) registrados nos últimos 50 anos, destacam-se os ocorridos em 1973/1974/1975/1976, 1988/1989 e 1998/1999/2000 e 2007/2008/2009/2010 disponíveis pelo Climate Prediction Center, NOAA em <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov>. Durante eventos de El Niño, observam-se anomalias positivas na temperatura do ar e na precipitação nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (Grimm et al., 2006; Valente, 2022; Valente et al., 2023), enquanto que a região Nordeste enfrenta condições de seca. Os períodos de 1982/1983, 1987, 1992, 1997/1998, 2015/2016 e 2023 se destacam como alguns dos episódios de El Niño mais significativos (Berlato e Fontana, 2003; Pereira et al., 2017; NOAA, 2023).

Os impactos decorrentes do ENOS sobre o clima do Estado do Rio Grande do Sul (RS) tem sido amplamente documentados na literatura científica (Fontana et al, 1997; Fernandes et al., 2002; Grimm et al.,1998, 2000; Berlato et al., 2005; Lopes et al., 2007; Firpo et al., 2012; Barros et al., 2013; Matzenauer et al., 2018; Bitencourt et al., 2020) indicando influência significativa sobre o clima local. Durante os episódios de El Niño, observa-se um aumento da umidade na primavera (SON) com um pico de precipitação em novembro. Por outro lado, nos anos de La Niña, são registradas notáveis anomalias negativas de precipitação, com a seca atingindo seu auge em novembro (Grimm et al., 1998).

Em termos dos níveis atmosféricos inferiores, as mudanças atribuídas ao El Niño resultam no fortalecimento do jato de ar de baixos níveis a leste dos Andes, enquanto as ligadas à La Niña tendem a enfraquecê-lo. (Grimm e Tedeschi, 2006). Conforme esses autores, flutuações impactam o transporte de umidade para dentro (ou para fora) da região Sul do Brasil, resultando na convergência (ou divergência) do fluxo de umidade nessa área durante os episódios de El Niño (ou La Niña).

Os vendavais que afetam o RS ocorrem ao longo de todo ano, embora como indicado por Nedel et al. (2012), apresentam um aumento significativo desses eventos a partir dos meses de inverno, atingindo o pico na primavera e diminuindo nos meses seguintes. Os meses de novembro e outubro são os mais impactados, enquanto junho e julho registram períodos de ventos menos intensos. O ano de 2009 destacou-se pela ocorrência de vendavais mais intensos sobre o estado do RS, coincidindo com a influência do El Niño forte de 2009-2010.

Dentre as regiões do RS influenciadas pelo ENOS está a Lagoa dos Patos (LP), uma laguna situada no extremo sul do Brasil, sob o clima subtropical-extratropical (Bitencourt et al., 2020; Távora et al., 2020). Em escalas temporais sinóticas, a circulação na LP é predominantemente influenciada pelos ventos em superfície (Möller et al., 2001). Por ser

considerada uma lagoa rasa a ação dos ventos manifesta-se na transferência de momento pela fricção direta sobre sua superfície. Este processo desencadeia a formação de seiches, sobretudo na região superior e central da lagoa (Möller, 1996), cujos movimentos podem propagar-se até o fundo, ocasionando a ressuspensão de sedimentos. Entretanto, durante os eventos de El Niño, há um aumento na precipitação sobre a região da LP, e os rios tornam-se a principal forçante hidrodinâmica da lagoa (Möller et al., 1996). Nos períodos em que as descargas dos rios são baixas, a ação do vento reassume o papel de principal mecanismo na circulação da LP (Möller et al., 2001).

A LP, situada em uma planície costeira, está diretamente sujeita à influência dos ventos, que atingem maior intensidade nos períodos de outono e inverno. Esses ventos desempenham um papel essencial na circulação da LP, operando por meio de efeitos diretos e indiretos. O efeito direto está associado à atuação direta do vento sobre a superfície da lagoa, desencadeando oscilações ascendentes e descendentes do nível da água. Por outro lado, o efeito indireto está relacionado às variações no nível da água costeira, influenciadas pelo mecanismo de transporte de Ekman (Möller et al., 1991, 2001).

A investigação da dinâmica costeira da LP tem sido focada na análise dos impactos do vento e da descarga fluvial a curto prazo (Möller, 1996; Möller et al., 1996; Möller et al., 2001; Fernandes, 2001; Fernandes et al., 2002; Fernandes et al., 2004). No entanto, a análise da influência dos ventos na dinâmica costeira em escalas temporais mais longas é ainda limitada pela ausência de longas séries de dados observacionais. Neste sentido, bases de dados climáticos disponíveis, como a atual reanálise atmosférica do ECMWF (ERA5) tem sido utilizada como base para estudos climáticos em diversas regiões do Brasil (Fernandes et al., 2021; Reis, 2021; Coriolano et al., 2022).

A compreensão da variabilidade e tendência dos ventos em superfície é essencial para a gestão adequada dos ambientes costeiros. Além disso, é importante entender também o papel do vento a longo prazo sobre ambientes costeiros aquáticos, especialmente considerando que a LP se destaca por sua característica rasa, o que intensifica a influência do vento tornando-o uma forçante crucial que influencia a circulação de água e sedimentos desse ecossistema (Bitencourt et al., 2020; Bortolin et al., 2022) e sua análise permite identificar padrões climáticos regionais, tais como variações sazonais e interanuais, que podem afetar significativamente o funcionamento desses ambientes. Assim, esse estudo tem por objetivo analisar como os ventos em superfície variam ao longo do tempo na região da LP durante os períodos de ENOS, e identificar possíveis padrões, tendências ou relações entre esse fenômeno climático e a dinâmica dos ventos na área estudada.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência de eventos fortes e moderados do ENOS na dinâmica dos ventos na região da Lagoa dos Patos, extremo sul do Rio Grande do Sul (RS).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a variabilidade sazonal e interanual dos ventos em superfície na região da Lagoa dos Patos;
- Analisar os impactos das diferentes fases (El Niño vs La Niña) e intensidades (forte vs moderado vs fraco) do fenômeno ENOS sobre a dinâmica dos ventos em superfície na Lagoa dos Patos;
- Determinar as tendências nas escalas sazonal e interanual dos ventos em superfície na região da Lagoa dos Patos para anos ENOS.

## 3. DADOS E MÉTODOS

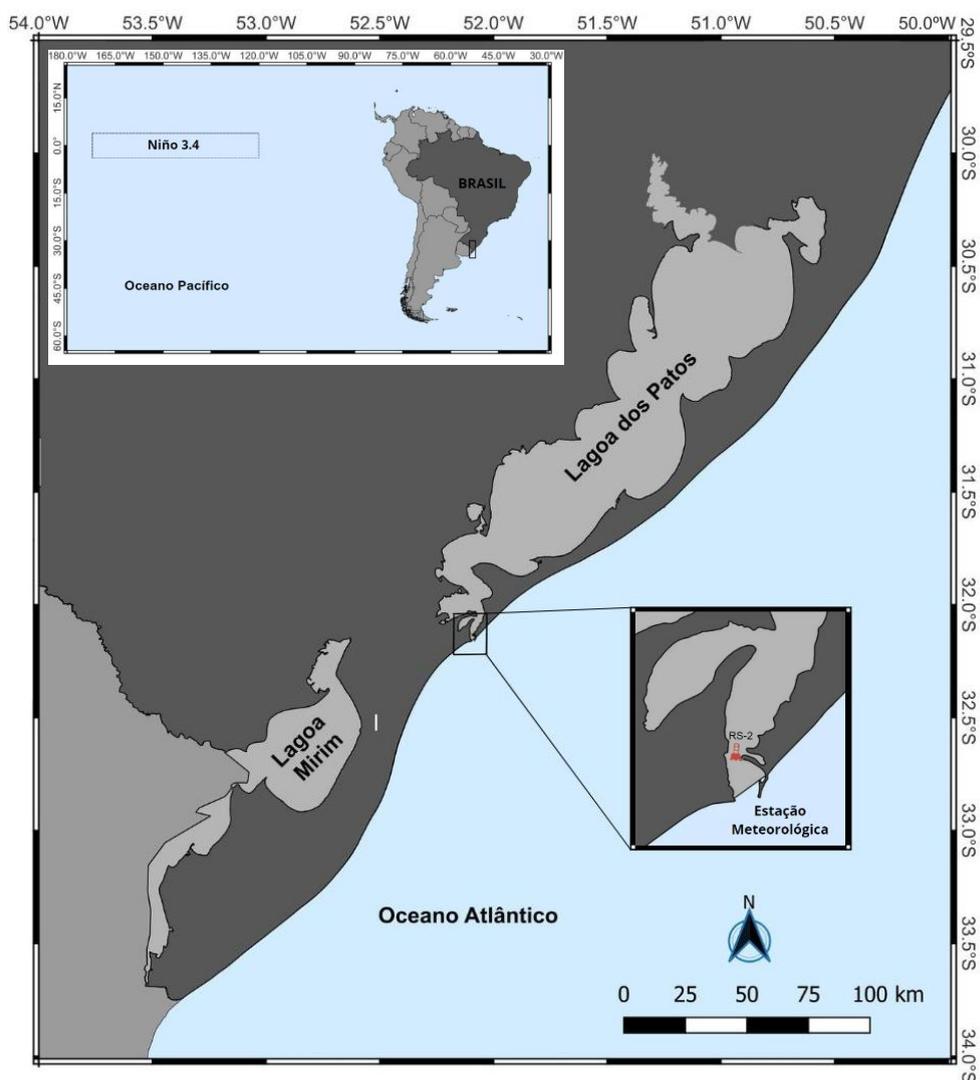
### 3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Localizada no extremo sul do Brasil, a Lagoa dos Patos (LP) é a maior lagoa costeira do tipo estrangulada do mundo (Kjerfve, 1986), abrangendo mais de 10.000 km<sup>2</sup> e profundidade média de 5 m. Estabelece conexão com a Lagoa Mirim pelo Canal São Gonçalo e com o Oceano Atlântico Sul através de um canal estreito (Möller et al., 2001).

As marés na região da LP são classificadas como micromarés, com amplitude média de 0,3 m (Möller et al., 2007), causando pouca influência sobre esse ambiente por ser mais restrita ao litoral e à zona estuarina mais inferior (Fernandes et al., 2004). A descarga fluvial e a ação dos ventos são os principais mecanismos que governam a dinâmica e circulação da LP (Moller et al. 2001; Fernandes et al., 2002; Marques, 2005). Os principais rios que desaguam na LP são o Guaíba, o Camaquã e o Canal São Gonçalo, responsáveis por uma descarga média de 2.400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, com variações sazonais que podem levar a altas descargas no final do inverno e no início da primavera, e descargas moderadas no verão e outono (Möller et al., 2001).

Esta região está sujeita principalmente à variabilidade interanual promovida pelo modo de

variabilidade climática ENOS (Bitencourt et al., 2020; Távora et al., 2020). Durante a fase quente (El Niño) ocorre um aumento da precipitação e os rios tornam-se a principal forçante da Lagoa, podendo chegar a uma vazão de  $12.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Möller et al., 1996). Por outro lado, durante a fase fria (La Niña), a descarga é baixa ou moderada. Durante os períodos em que as descargas dos rios são baixas, a ação do vento atua como o principal mecanismo sobre a circulação da lagoa (Möller et al., 2001). A predominância de ventos ao longo do ano é de direção nordeste, com a mudança na sua direção para sul e sudoeste quando há passagem de frentes frias (Möller et al., 1996). Durante a predominância do vento de NE ocorre um abaixamento do nível d'água na costa, favorecendo os fluxos em direção ao oceano, enquanto que com a inversão dos ventos na passagem de frentes frias ocorre o inverso (Castelão e Möller Jr., 2003).



**Figura 1** – A imagem à esquerda indica a região do Niño 3.4 localizado no oceano Pacífico. A direita mostra a localização da área de estudo, em destaque, está a estação meteorológica do SiMCosta localizada na Lagoa dos Patos, responsável pela coleta de dados meteoceanográficos.

## 3.2 DADOS CLIMÁTICOS

Os dados climáticos utilizados neste estudo foram obtidos da base de dados da reanálise atmosférica ERA5 para o período de 42 anos, de janeiro de 1979 a dezembro de 2021. O ERA5 é a quinta geração de reanálises globais do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), com dados desde 1950 até os dias atuais, disponíveis pelo Copernicus Climate Change Service em <https://apps.ecmwf.int/data-catalogues/era5/?class=ea>. O ERA5 fornece estimativas horárias de um grande número de variáveis climáticas atmosféricas, terrestres e oceânicas, com informações sobre incertezas para todas as variáveis em resoluções espaciais e temporais reduzidas. A cobertura de dados do ERA5 é global, com uma resolução espacial horizontal de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (~30 km), sendo a atmosfera resolvida em 137 níveis da superfície até a altura de 80 km e resolução temporal de hora em hora, com atualização diária.

Foram obtidos dados mensais de TSM na área correspondente ao Niño 3.4 do Oceano Pacífico e dados diários das componentes zonal (u) e a meridional (v) do vento a 10 m, com horário fixado às 12 h, sobre o estado do RS, abrangendo também a região adjacente à plataforma continental, compreendida entre as latitudes de  $29,5^\circ\text{S}$  a  $34^\circ\text{S}$  e as longitudes de  $54^\circ\text{O}$  a  $50^\circ\text{O}$ . E o tratamento e análise dos dados climáticos foram realizados utilizando os softwares Climate Data Operators (CDO) e MATLAB® (licença acadêmica da UFMA n. 40981746), que foram empregados para realizar o pré-processamento e tratamento dos dados de TSM e vento a 10 m.

### 3.3.1 Cálculo do Índice Oceânico do Niño (ION)

De acordo com esses critérios definidos pelo *Climate Prediction Center da National Oceanic and Atmospheric Administration* (CPC/NOAA, disponível em [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)), para que seja considerado El Niño, o Índice Oceânico do Niño (ION) deve apresentar anomalias trimestrais iguais ou superiores a  $+0,5^\circ\text{C}$  acima da média trimestral histórica na região do Oceano Pacífico Equatorial Central e/ou Leste, por um período contínuo de pelo menos 3 meses. Já para que seja considerado um evento de La Niña, os valores devem ser iguais ou inferiores a  $-0,5^\circ\text{C}$  abaixo da média histórica, na mesma região e pelo mesmo período consecutivo. Neste estudo, os eventos de El Niño e La Niña são classificados em três categorias de intensidade (Tab. 1): Fraco (com uma anomalia de TSM de  $0,5$  a  $0,9^\circ\text{C}$ ), Moderado ( $1,0$  a  $1,4^\circ\text{C}$ ), Forte ( $1,5$  a  $1,9^\circ\text{C}$ ) e Severos ( $\geq 2,0$ ). Os eventos classificados como de intensidade fraca e de anos normais (anomalias de TSM menores que  $\pm 0,5$ ) não foram analisados neste estudo.

As médias mensais de TSM obtidas da reanálise ERA5 para a região do Niño 3.4 foram utilizadas para calcular as médias trimestrais com uma janela móvel de um (1) mês, considerando um período de 42 anos de dados (de 1979 a 2021). Isso resultou em um total de 12 médias trimestrais, representadas por DJF, JFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA, JAS, ASO, SON, OND e NDJ. Em seguida, foi subtraída a média trimestral (p.e., FMA,) da média trimestral de cada ano (p.e., FMA de 1979) para obter a anomalia trimestral média para FMA de 1979. Ou seja, para cada ano analisado, a média trimestral foi subtraída da média de 30 anos correspondente àquele trimestre, permitindo o cálculo da anomalia trimestral para cada ano. O índice foi calculado para a região do Niño 3.4, delimitada pelas latitudes de 5°N a 5°S e longitudes de 170°O a 120°O (conforme ilustrado na Figura 1).

**Tab. 1** - Anos de ENOS no Oceano Pacífico Equatorial (Niño 3.4) classificados quanto à fase (El Niño vs La Niña) e intensidade (Forte vs Moderado), com base na reanálise ERA5 para os anos de 1979 a 2021.

Episódio	Forte	Moderado
<b>El Niño</b>	1982*, 1983, 1987, 1991, 1992, 1997*, 1998, 2009, 2015*, 2016	1986, 1994, 2002, 2003, 2006
<b>La Niña</b>	1988*, 1989, 1999, 2010, 2011	1984, 1985, 1995, 2020

\* indicam anos de ENOS classificados como severos.

Fonte: Autor (2023)

### 3.3.2. Construção de compostos de vento em superfície para os anos de ENOS

Os arquivos de dados mensais de vento a 10 m obtidos da reanálise ERA5 para a região da LP foram separados (*cdo slipt*) por trimestres (DJF, JFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA, JAS, ASO, SON, OND e NDJ), e então calculada a média climatológica (considerando a série tempo dos 42 anos) para cada trimestre (*cdo timmean*). Após selecionados os trimestres, os dados de vento foram seccionados em anos (1979, 1980, 1981,... 2021). A partir daí, a anomalia trimestral para cada ano foi calculada subtraindo-se da média trimestral de cada ano, isoladamente, a média climatológica computada para aquele trimestre. Por fim, as anomalias trimestrais das

componentes (u, v) do vento foram agrupadas (*cdo merge*) de forma a auxiliar na construção dos compostos de anomalias de vento em superfície para anos de ENOS.

A partir dos limiares estabelecidos pelo ION, os anos de ocorrência das diferentes fases (El Niño vs La Niña) e intensidades (Forte vs Moderado) do ENOS foram identificados e então selecionados para construção dos compostos de anomalias trimestrais de vento a 10m. Esse processamento foi realizado no *software* MATLAB®, utilizando-se da licença acadêmica da UFMA (n. 40981746).

### 3.4 ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA REANÁLISE DO ERA5

A validação dos dados de reanálise do ERA5 envolveu a comparação dos resultados desse modelo com os dados *in situ* provenientes da Boia do SiMCosta, localizada na área de estudo conforme mostrado na Figura 1. Essa análise foi conduzida ao longo do mesmo período de tempo, abrangendo de fevereiro de 2019 a outubro de 2021. A escolha desse intervalo de tempo baseou-se na disponibilidade integral de dados na bóia do SiMCosta, assegurando a ausência de falhas nos registros durante esse período contínuo. Essa comparação foi realizada utilizando métodos estatísticos, tais como a correlação linear de Pearson ( $r$ ), o Erro Médio Absoluto Relativo (RMAE) e a Raiz Quadrática Média do Erro (RMSE).

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) é uma métrica que quantifica a associação linear entre variáveis (Figueiredo Filho et al., 2009). A expressão matemática que o define é a seguinte:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

$x$  e  $y$  representam as variáveis a serem correlacionadas;

A Tabela 2 apresenta a classificação da correlação de Pearson, conforme estabelecido por Sasaki (2014). Essa classificação proporciona uma compreensão do grau de associação linear entre as variáveis avaliadas.

**Tab. 2** - Classificação da intensidade da correlação de Pearson, baseada em Sasaki (2014).

Valor (r)	Intensidade da Correlação
$ r  < 0,3$	Fraca
$0,3 <  r  < 0,5$	Moderada
$0,5 <  r  < 0,7$	Moderada para Forte
$ r  > 0,7$	Forte

Com o objetivo de avaliar a significância da correlação entre as séries temporais, foi calculado o valor  $p$  como indicador. Adotou-se um limiar de significância de 0,05 para aceitar ou rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ), que sugere uma correlação significativa. Se  $p > 0,05$ ,  $H_0$  é aceita, indicando a ausência de correlação; caso contrário, se  $p < 0,05$ , a hipótese alternativa é aceita, sugerindo a significância da correlação. O resultado dessa análise produz valores extremos de -1 (indicando correlação negativa) a +1 (indicando correlação positiva), enquanto o valor nulo sugere a ausência de correlação entre as variáveis aplicadas (PRESS et al., 1992). Os coeficientes de correlação ( $r$ ) foram calculados mediante a aplicação da Equação 1, considerando um nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ).

A avaliação da qualidade de dados de reanálise também pode ser realizada por meio do RMAE (Equação 2), cujo valor próximo a zero indica maior proximidade com os dados comparados. A classificação da qualidade dos resultados segue a tabela 3, onde valores específicos do RMAE são associados a diferentes categorias.

$$RMAE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ERA,i} - X_{bóia,i})}{\sum_{i=1}^n (X_{bóia,i})} \quad (\text{Equação 2})$$

**Tab. 3** - Classificação da qualidade do resultado de acordo com os valores de RMAE, baseado por Walstra et al. (2001).

RMAE	Classificação
<b>RMAE &lt; 0,2</b>	Excelente
<b>0,2 &lt; RMAE &lt; 0,4</b>	Boa
<b>0,4 &lt; RMAE &lt; 0,7</b>	Razoável
<b>RMAE &gt; 0,7</b>	Ruim

O RMSE representa uma métrica amplamente utilizada para avaliar as discrepâncias entre os valores preditos por um modelo e os valores observados. No contexto deste estudo, o RMSE foi aplicado para quantificar as disparidades entre os dados provenientes da reanálise ERA5 e as medições obtidas pela bóia. Através da equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X_{ERA,i} - X_{bóia,i})^2}{n}} \quad (\text{Equação 3})$$

onde para equação 2 e 3:

$X_{ERA,i}$  representa a série temporal a ser correlacionadas (reanálise ERA5);

$X_{bóia,i}$  representa a série temporal medida (SiMCosta);

### 3.5 PADRONIZAÇÃO DA ALTURA DOS DADOS DE VENTO

Os dados de vento provenientes da boia meteo-oceanográfica do SiMCosta (RS-2, disponível em <https://simcosta.furg.br/home>), são medidos a uma altura de 3,3 m, enquanto os dados de reanálise do ERA5 utilizados nesta pesquisa são obtidos a 10 m de altura. Com o propósito de assegurar a integridade nas comparações entre os dados observados e de reanálise, torna-se necessário harmonizar as alturas para um valor comum. A estratégia adotada implica a aplicação de uma equação de correção de altura que considera a discrepância de altura entre os

dados observados e os dados de reanálise. A Equação 4 é empregada para descrever a variação da velocidade do vento com a altura na subcamada inercial atmosférica, conforme proposto por Sadhu (1981):

$$V_{10m} = V_{3,3m} * (\ln(\frac{10}{z_0}) / (\ln(\frac{3,3}{z_0}))) \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

$V_{10m}$  representa a velocidade do vento corrigida para 10 metros;

$V_{3,3m}$  é a velocidade do vento medida a 3.3 metros;

$z_0$  é o comprimento da rugosidade da superfície.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

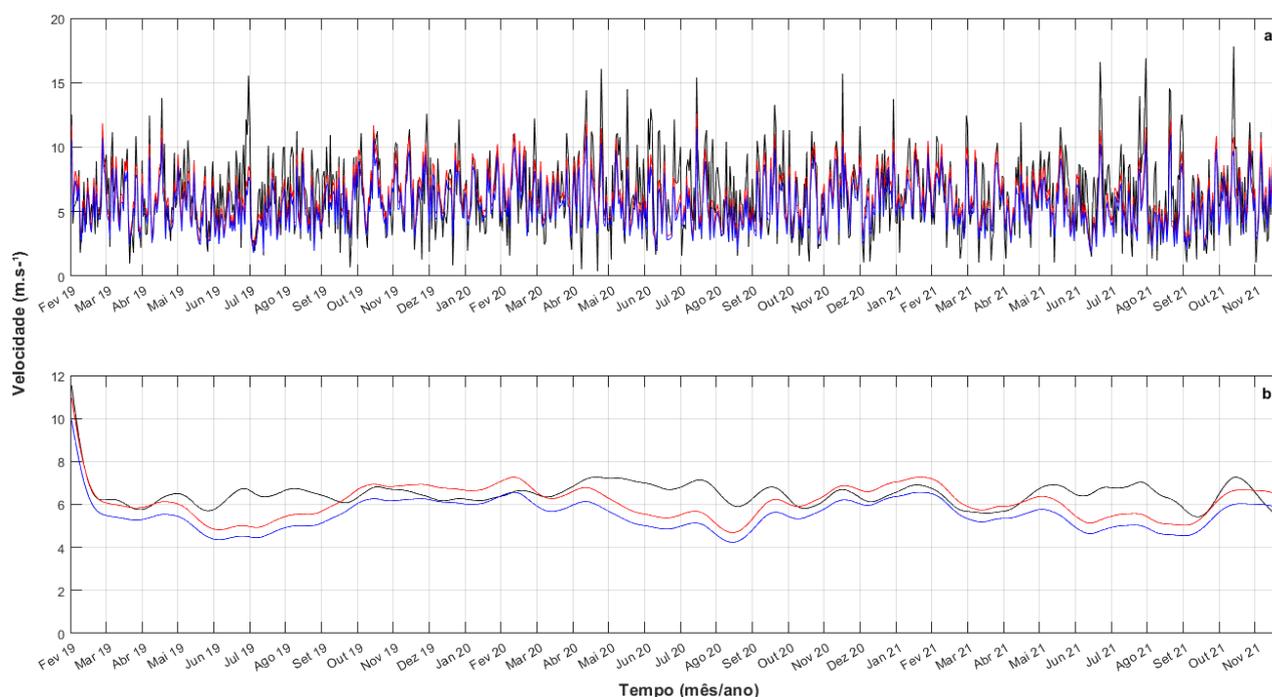
### 4.1 VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS DE REANÁLISE DE ONDA E VENTO

#### 4.1.1 Vento superficial a 10 m

A velocidade média do vento a 10 m da reanálise ERA5 foi comparada aos dados da boia do SiMCosta. Esta última fonte foi avaliada tanto sem a correção da altura, representando os dados medidos a 3,3 m, quanto com a correção para 10 m, utilizando a equação 4. Para uma melhor compreensão da relação entre esses conjuntos de dados, empregamos os resultados de ambas as configurações dos dados da bóia. Observou-se que a velocidade do vento proveniente da base de reanálise do ERA5 (Figura 2a, linha preta) exibiu um comportamento semelhante às medições da bóia do SiMCosta (Figura 2a, linha vermelha - com correção de altura; linha azul - sem correção de altura), ou seja, ambas as séries de dados de velocidade do vento representam o padrão sazonal esperado para a região, sem grandes defasagens entre elas. A Figura 2b destaca a filtragem mensal dos dados, evidenciando ainda mais que a base de dados do ERA5 é capaz de capturar a sazonalidade dos ventos na região medida pela bóia. Ao longo da série temporal completa, observou-se que o ERA5 exibiu consistentemente uma propensão a superestimar os dados da bóia, sem levar em consideração a correção de altura. Por outro lado, os dados da bóia com correção de altura mostraram-se superiores às médias observadas nos dados de reanálise do ERA5 em alguns períodos específicos, sendo essas diferenças mais evidentes principalmente entre o final de setembro e o início de abril de cada ano. Notavelmente, a correção de altura dos dados mostra ter aproximado mais a série temporal da bóia em relação aos valores do ERA5,

especialmente durante os períodos em que os ventos apresentaram menor intensidade na região da LP, compreendendo o final de outono e o inverno em toda série temporal. Durante esses períodos é possível observar as linhas que representam os valores de velocidade se aproximando mais das do ERA5 (Fig. 2b).

Por essa razão, optou-se por utilizar os dados da bóia do SimCosta, corrigidos para 10 m de altura, nas análises subsequentes descritas ao longo do trabalho.

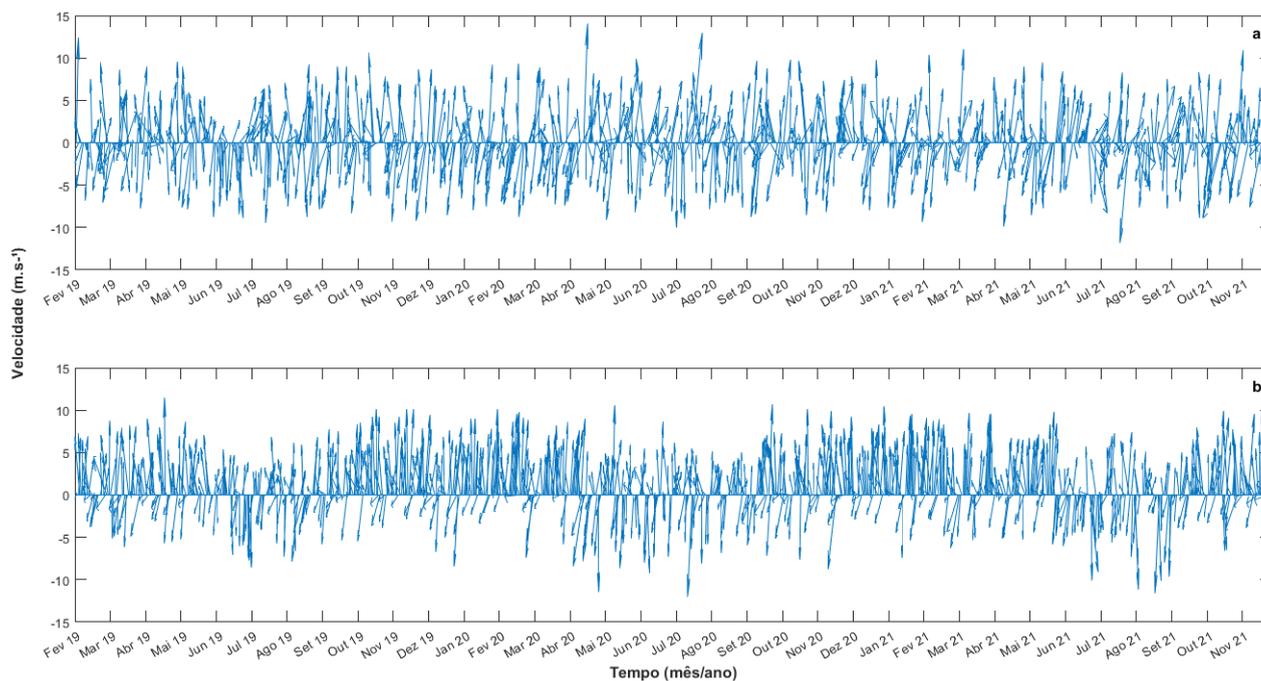


**Figura 2** - Séries temporais (Fevereiro de 2019 a Outubro de 2021) do vento superficial a 10 m simuladas pela reanálise ERA5 (preto), medidas pela bóia RS-2 SiMCosta com correção de altura (vermelho) e sem correção de altura (azul): **(a)** sem filtro; **(b)** com filtro passa-baixa com janela mensal.

Ao analisar as séries temporais, é possível observar flutuações ao longo do tempo nas medições do vento. Por isso a figura 3 mostra as variações dos ventos em superfície na região da LP. No gráfico (a), apresentamos as variações de velocidade do vento para reanálise ERA5, enquanto no gráfico (b), foi destacado as medições correspondentes da boia do SiMCosta. Os valores positivos na série temporal da velocidade média indicam ventos de norte, enquanto valores negativos indicam ventos de sul.

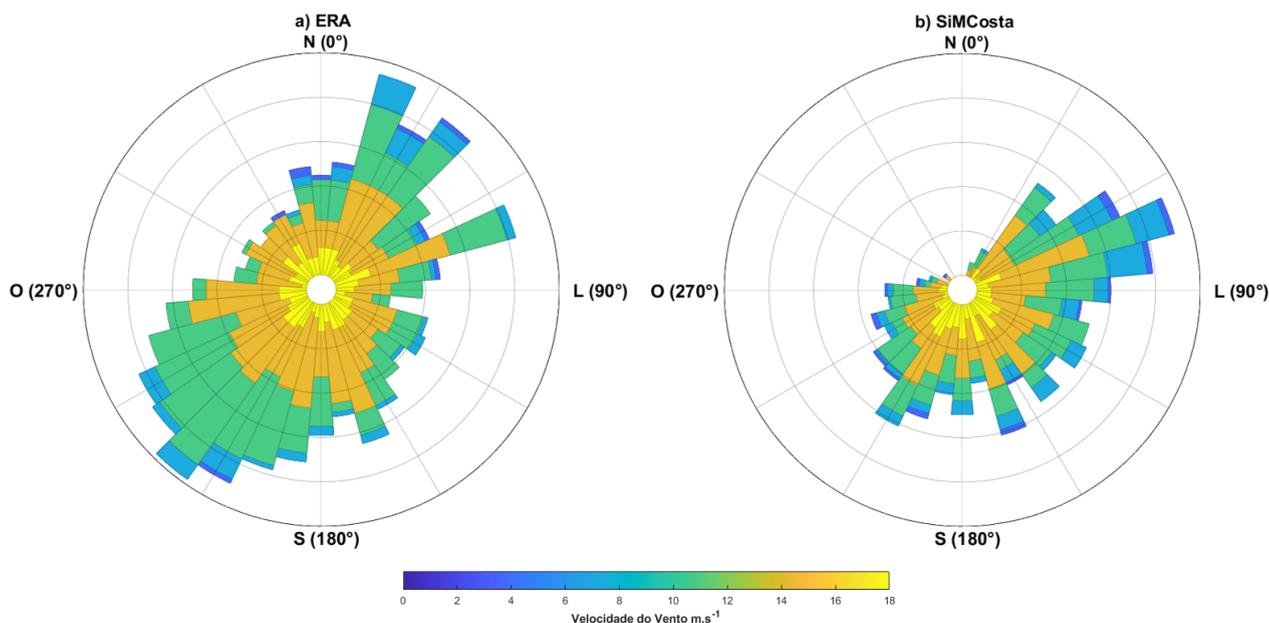
A avaliação dos ventos registrados pela boia destacou uma marcante prevalência de ventos provenientes do quadrante sul. Quanto ao ERA5, embora tenha exibido uma distribuição praticamente equitativa entre os quadrantes norte e sul, também é observada uma predominância

de ventos do quadrante sul.



**Figura 3** - Variação da velocidade do vento a 10 metros (Fevereiro de 2019 a Outubro de 2021) nos quadrantes norte e sul para o ERA5 (a) e a boia do SiMCosta (b).

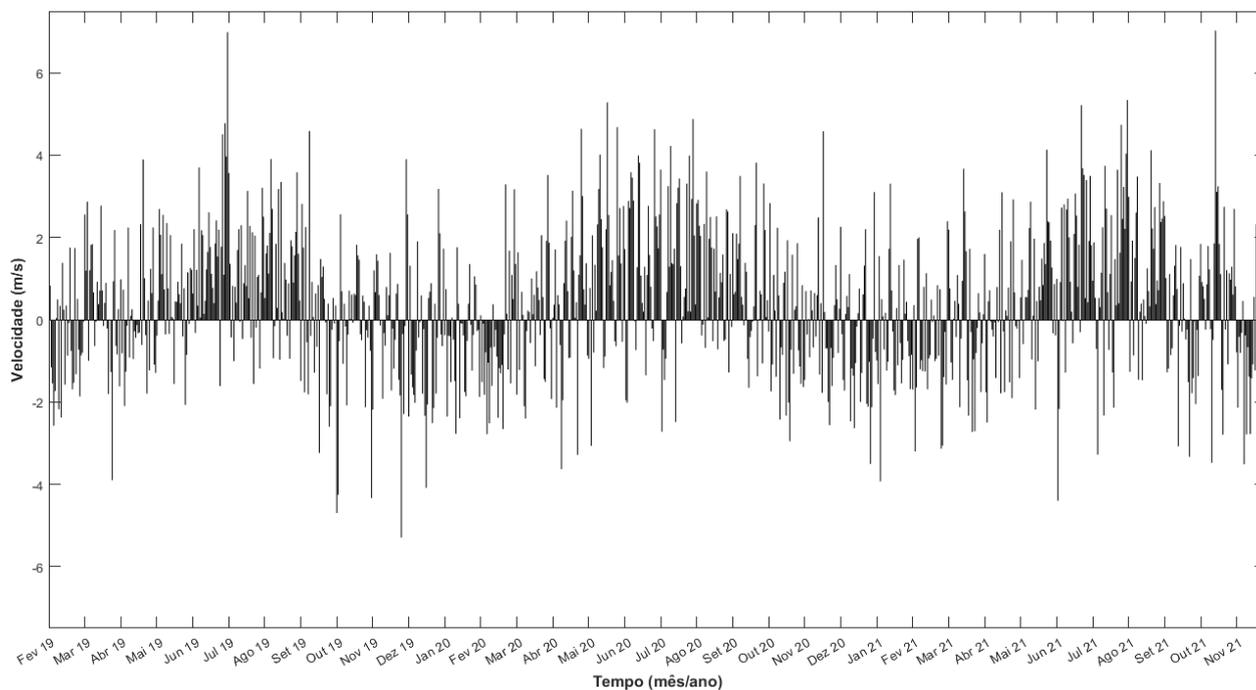
O histograma direcional na figura 4, confirma a distribuição do vento na região entre os quadrantes norte e sul, mostrando que os ventos em superfície são predominantemente de nordeste e de sudoeste.



**Figura 4** - Histograma direcional do vento a 10 m: **a)** ERA5 e **b)** SiMCosta para as coordenadas da boia do SimCosta mostrada na figura 1, para o período de 2019 a 2021

#### 4.1.2 Diferenças entre os dados simulados e medidos

Para identificar os períodos específicos nos quais a reanálise ERA5 apresenta superestimação e/ou subestimação em relação aos dados medidos pela bóia, foi calculada a diferença simples entre as séries (Figura 5). Os resultados revelaram um viés médio da ordem de  $0,35 \text{ m.s}^{-1}$ . As maiores diferenças positivas foram registradas nos meses de junho de 2019 ( $6,9 \text{ m.s}^{-1}$ ) e novembro de 2021, quando atingiu um valor máximo de  $7,02 \text{ m.s}^{-1}$ . No que diz respeito ao viés negativo, o ERA5 subestima os valores da bóia em  $-4,7$  e  $-5,2 \text{ m.s}^{-1}$  em setembro e novembro de 2019, respectivamente. Em geral, há uma predominância de picos positivos em relação aos negativos, sugerindo que a reanálise ERA5 tende a superestimar mais os valores da bóia.



**Figura 5** - Viés entre as séries temporais de vento a 10 m do ERA5 e SiMCosta.

#### 4.1.3 Correlação, Dispersão, Erro Quadrático Médio e Erro Médio Absoluto Quadrático entre os dados simulados e medidos

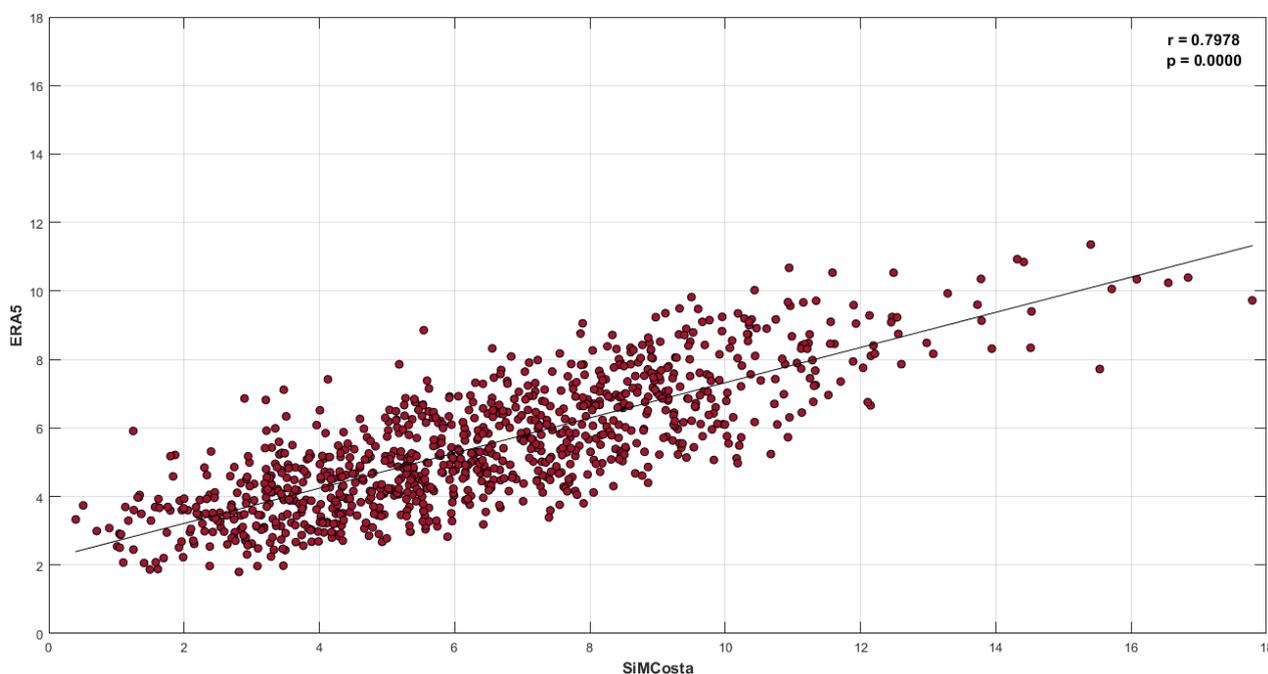
Nesta seção, são apresentadas análises de correlação, dispersão, RMSE e RMAE entre o conjunto de dados do ERA5 e os dados da bóia. Essas análises foram conduzidas considerando tanto a série bruta (sem correção de altura) quanto a série corrigida em relação à altura. O objetivo é compreender as melhorias nos dados obtidas por meio dessa correção, conforme detalhado na Tabela 5.

A correlação entre os dados de reanálise e os da boia revelou consistência, não apresentando diferenças significativas com ou sem a correção de altura. Em ambos os casos, a correlação foi considerada forte, chegando a  $\sim 0,8$ . Isso sugere que os valores simulados pelo ERA5 estão estreitamente alinhados com as medições do vento pela bóia do SiMCosta. Os resultados do RMSE indicaram uma diferença entre os cenários ERA-SiMCosta com correção ( $1,7654 \text{ m.s}^{-1}$ ) e sem correção de altura ( $2,0016 \text{ m.s}^{-1}$ ), destacando uma maior dispersão no último. O desempenho global do ERA5 foi considerado excelente, com valores de RMAE abaixo de 0,2, registrando 0,0584 para os dados corrigidos e 0,1711 para os não corrigidos. Esses resultados reforçam a confiabilidade da reanálise ERA5 na representação precisa da intensidade do vento em superfície sobre a região da LP, especialmente quando a correção de altura é considerada na análise dos dados.

**Tab. 4** - RMSE, RMAE e coeficiente de correlação ( $r$ ) entre ERA5 e a bóia do SiMCosta durante os respectivos períodos de medições.

ERA5	RMSE	RMAE	Correlação ( $r$ )
<b>SiMCosta - com correção</b>	1,7654	0,0584	0,7978
<b>SiMCosta - sem correção</b>	2,0016	0,1711	0,7978

Para complementar os indicadores estatísticos, elaboramos o diagrama de dispersão (Figura 6) para visualizar a relação entre os dados simulados pela reanálise e os medidos pela bóia. A análise de dispersão revelou uma pequena variabilidade entre os conjuntos de dados, indicando um ajuste consistente da reanálise em relação às observações. A significância estatística, evidenciada pelo valor de  $p < 0,05$ , valida as correlações encontradas, aceitando-se o estabelecido pela hipótese  $H_0$ .

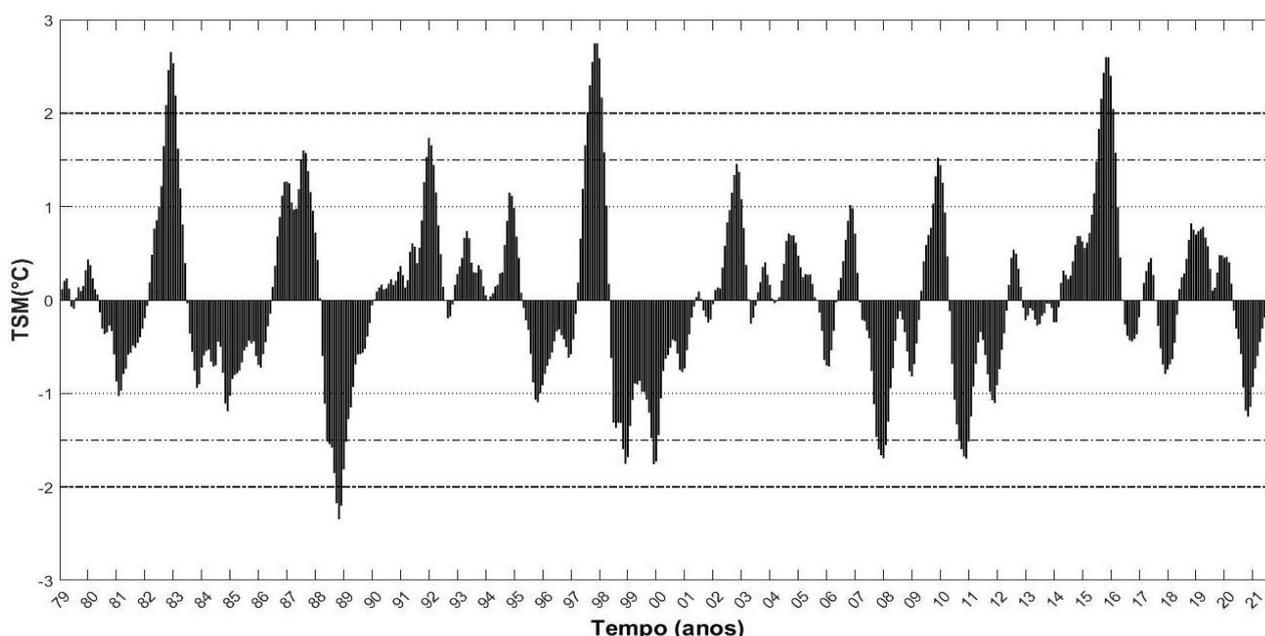


**Figura 6** - Dispersão entre os dados de vento a 10 m simulados (ERA5) e os dados medidos (SiMCosta).

## 4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS FASES E INTENSIDADES DOS EVENTOS DE ENOS

Na Figura 7 é mostrado o Índice Oceânico do Niño (ION) calculado para a região do Niño 3.4. A análise temporal para essa área evidenciou que no período analisado de 42 anos (1979 a 2021) houve maior ocorrência da fase quente (15 eventos) em relação à fase fria (9 eventos). Em ambas as fases do ENOS, os eventos fortes foram mais frequentes (10 El Niños, 5 La Niñas) do que os eventos moderados (5 El Niños, 4 La Niñas).

A análise do ION calculado para a região do Niño 3.4 revelou que os anos de 1982/1983, 1997/1998 e 2015/2016 se destacaram por apresentar os eventos mais severos de El Niño, isto significa que houve uma elevada anomalia de TSM ( $> 2^{\circ}\text{C}$ ) nessa região durante esses períodos, o que ocasionou impactos significativos nos padrões climáticos globais (Zong et al., 2019; Glynn et al., 2001; Jeong et al., 2022; Fan et al., 2023). Em contrapartida, os eventos de La Niña demonstraram maior intensidade nos anos de 1988/1989.



**Figura 7** - Representação do Índice Oceânico do Niño (ION), calculado a partir das anomalias trimestrais de temperatura da superfície do mar (TSM) obtidas da reanálise ERA5, na região do Niño 3.4, para o período compreendido entre os anos de 1979 a 2021. As linhas pontilhadas indicam os valores de referência para eventos moderados ( $\pm 1,0$ ), enquanto as linhas tracejadas marcam os valores de referência para eventos fortes ( $\pm 1,5$ ). Eventos classificados acima de 2,0 são considerados severos.

### 4.3 ANOMALIAS DE VENTO EM SUPERFÍCIE SOBRE A LAGOA DOS PATOS PARA AS DIFERENTES FASES E INTENSIDADES DO ENOS

Nas Figuras 8 a 11 são apresentados os compostos das anomalias trimestrais de vento em superfície sobre a região da Lagoa dos Patos (RS), considerando-se as diferentes fases (El Niño vs La Niña) e intensidades (Forte vs Moderado) do ENOS. As análises trimestrais revelaram que as anomalias de vento em superfície no domínio da Lagoa dos Patos e áreas adjacentes variaram entre  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  e  $1,1 \text{ m.s}^{-1}$  ao longo dos 42 anos de dados analisados.

Durante os eventos de El Niño forte (Figura 8) são observadas as anomalias positivas de vento a 10 m na região oceânica, especialmente a leste do domínio de estudo, enquanto que as anomalias mais baixas são observadas mais próximas à costa. Nota-se um aumento progressivo na velocidade do vento com início no trimestre FMA com predominância de ventos de nordeste em toda a região da LP, e estendendo-se até o trimestre de JJA. Essa mudança pode ser atribuída a mudanças na distribuição da pressão atmosférica, conforme indicado pelo deslocamento das isolinhas de maior intensidade do oceano em direção à costa. Esse deslocamento resulta nas velocidades de vento mais elevadas na borda leste da LP atingindo  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  durante o trimestre JJA (inverno), com ventos predominantemente de sudeste. Na região oceânica, a velocidade atinge  $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ , também na porção leste. Posteriormente, há uma gradual diminuição na velocidade do vento, com uma nova ocorrência de máxima intensidade sendo registrada na região mais afastada da costa durante o trimestre de OND (primavera e início do verão).

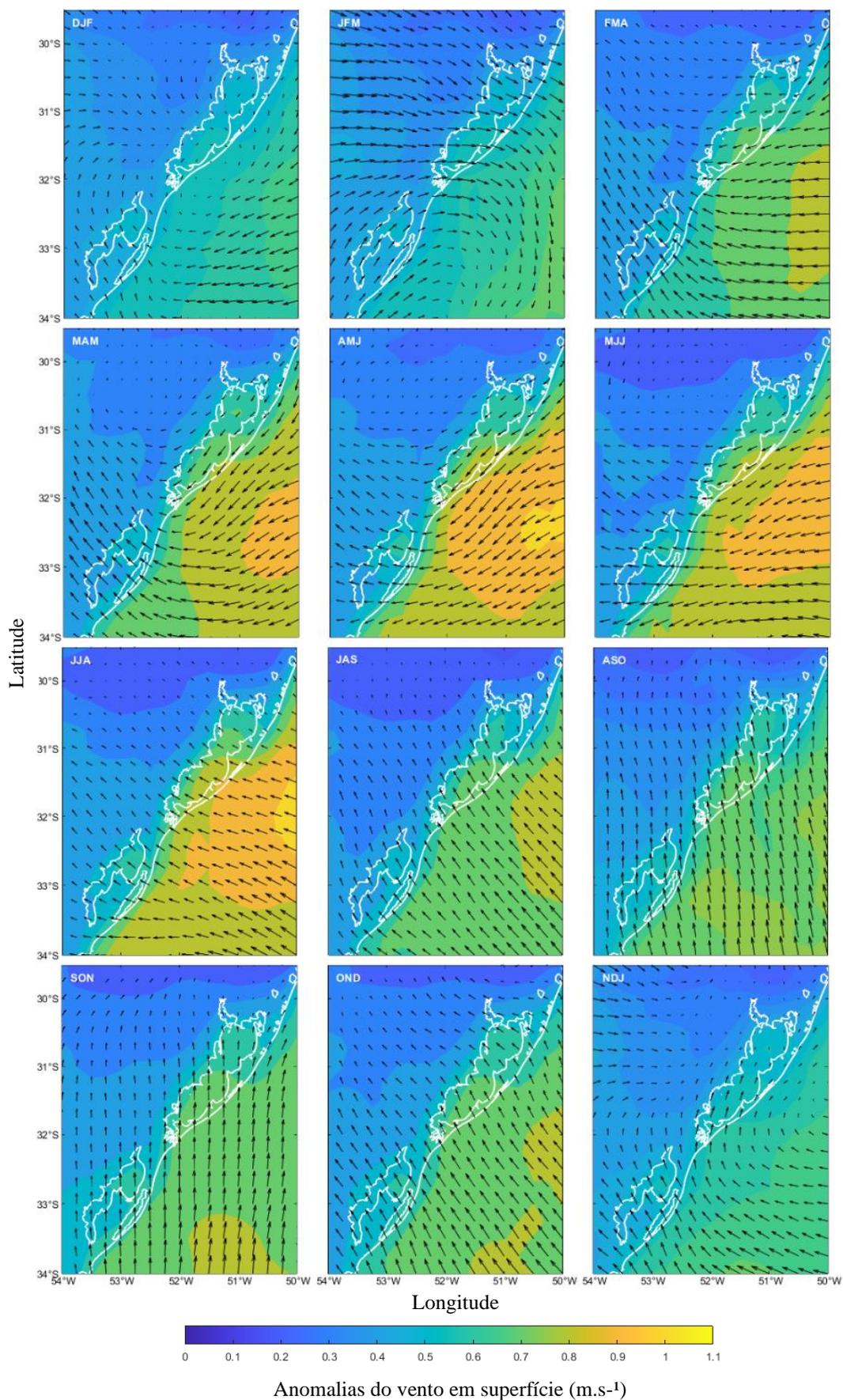
Durante o El Niño forte a predominância durante o experimento é de ventos nordeste e sudeste. Os ventos nordeste mostram-se mais influentes nas anomalias positivas nos trimestres de MAM, AMJ e MJJ, enquanto os ventos sudeste ganham destaque em JJA quando as anomalias atingem seu ápice dentro da LP. Em outras palavras, as anomalias positivas e mais expressivas ocorrem durante o inverno, coincidindo com a presença de ventos do quadrante sul. Essa tendência pode ser justificada pelas observações de Moller (1991), (2001); Andrade e Cavalcanti (2004), Andrade (2005), Cavalcanti e Kousky (2009), Pampuch e Ambrizzi (2015), que indicam que o inverno é a estação com maior incidência de sistemas frontais, diminuindo à medida que o verão se aproxima.

A região do Rio Grande do Sul destaca-se como o estado com a maior frequência de sistemas frontais, ocorrendo de junho a outubro, com uma média de aproximadamente 4 eventos por mês (Pampuch e Ambrizzi, 2015). A presença desses sistemas é notada simultaneamente a uma redução na temperatura, ao aumento na pressão ao nível médio do mar (PNMM) e à mudança do vento do quadrante norte para o quadrante sul (Cavalcanti e Kousky, 2009),

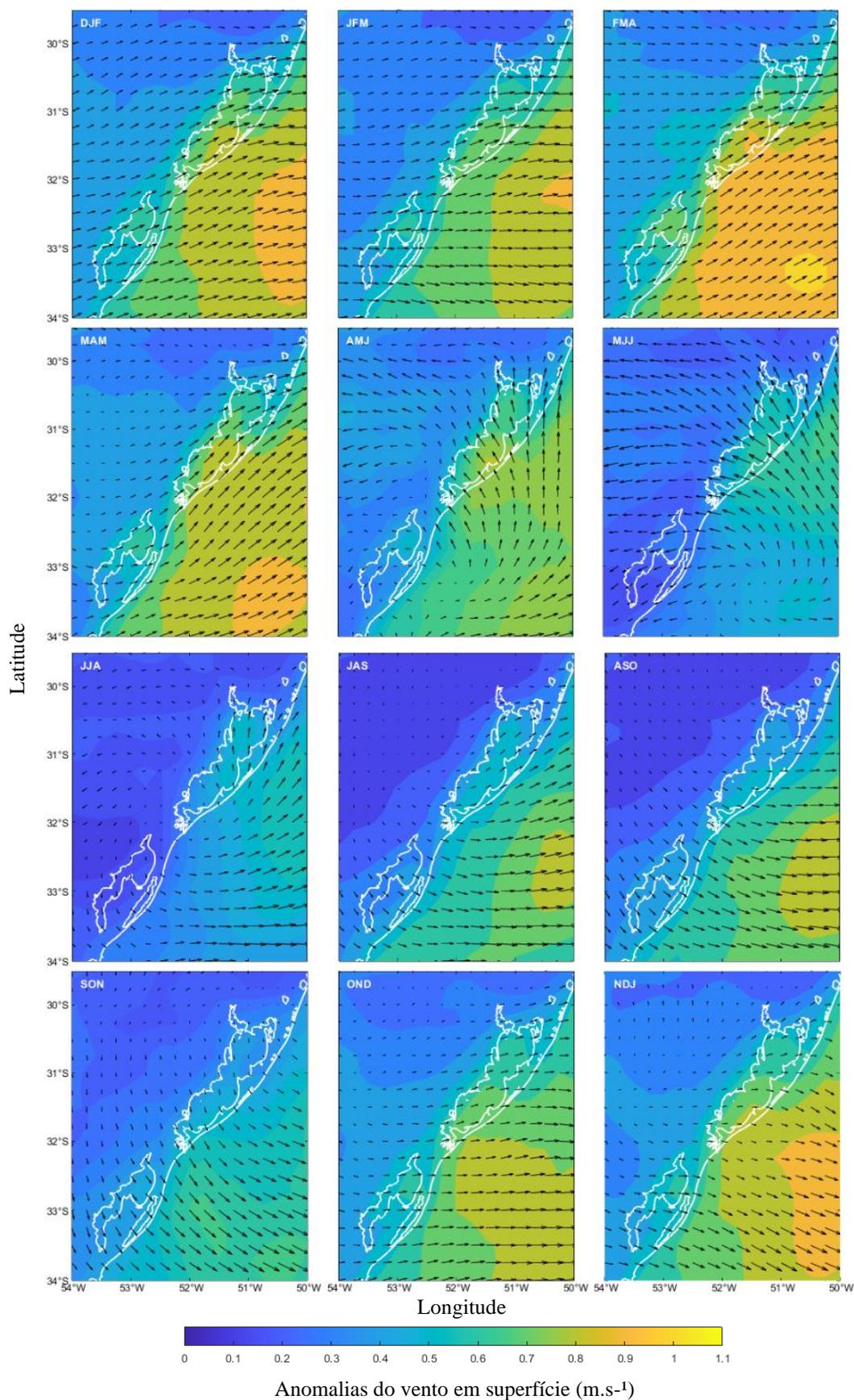
caracterizando a transição dos trimestres de MJJ, com ventos de nordeste, para JJA, com ventos de sudeste.

El Niño moderado (Figura 9) foram observadas anomalias de velocidade do vento variando de 0,2 a 1,0  $\text{m.s}^{-1}$  na região de estudo. Durante o trimestre de DJF (verão), notou-se uma tendência de deslocamento das isolinhas de maior intensidade do interior do oceano em direção à costa, indicando um potencial aumento na intensificação da circulação do vento sobre a região costeira, com ventos prevalentes de sudoeste. Subsequentemente, ocorre uma diminuição na intensidade, seguida por um novo aumento atingindo seu máximo para essa análise na região da borda leste da Lagoa em direção ao seu centro durante o final do verão e início do outono (FMA). Durante este período, foram registradas anomalias de velocidade de até 0,9  $\text{m.s}^{-1}$ , ainda com prevalência de ventos sudoeste na maior parte da região. Além disso, nesta fase, foram observadas velocidades de até 1  $\text{m/s}$ , concentradas em uma pequena região ao sudeste da área oceânica. Durante o período de outono, os ventos começam a enfraquecer e os ventos de sudoeste gradualmente passam a propagar-se de sudeste, atingindo velocidades mínimas de 0,12  $\text{m.s}^{-1}$  sobre o continente durante os meses de JJA e 0,33  $\text{m.s}^{-1}$  sobre a região oceânica. Esses ventos voltam a se intensificar na região da Lagoa entre a primavera e o verão (NDJ), com valores máximos alcançando até 0,8  $\text{m.s}^{-1}$ , e 0,9  $\text{m.s}^{-1}$  na região oceânica.

Durante esse evento, observou-se uma prevalência significativa dos ventos do quadrante sul em praticamente todos os trimestres, especialmente os ventos de sudoeste, destacando-se no trimestre de FMA na região da LP. Essa observação ressalta a influência sazonal nos ventos, com ênfase no aumento das anomalias positivas dos ventos do quadrante sul no final do verão e início do outono. Essa mudança sazonal é notavelmente evidente durante a transição entre as estações, refletida nos padrões de vento observados. Essa dinâmica é atribuída à alteração nas condições termodinâmicas da atmosfera e à entrada de massas de ar frio, à medida que a Massa Polar Atlântica (MPA) eleva sua frequência, exercendo controle sobre o clima na região. Esse fenômeno decorre da intensificação do Anticiclone Polar Atlântico (APA) e da gradual redução na entrada de radiação solar (Sartori, 2003).



**Figura 8** – Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de El Niño forte ocorrido na região do Nino 3.4 entre os anos de 1979 a 2021, compreendendo um total de 10 eventos.

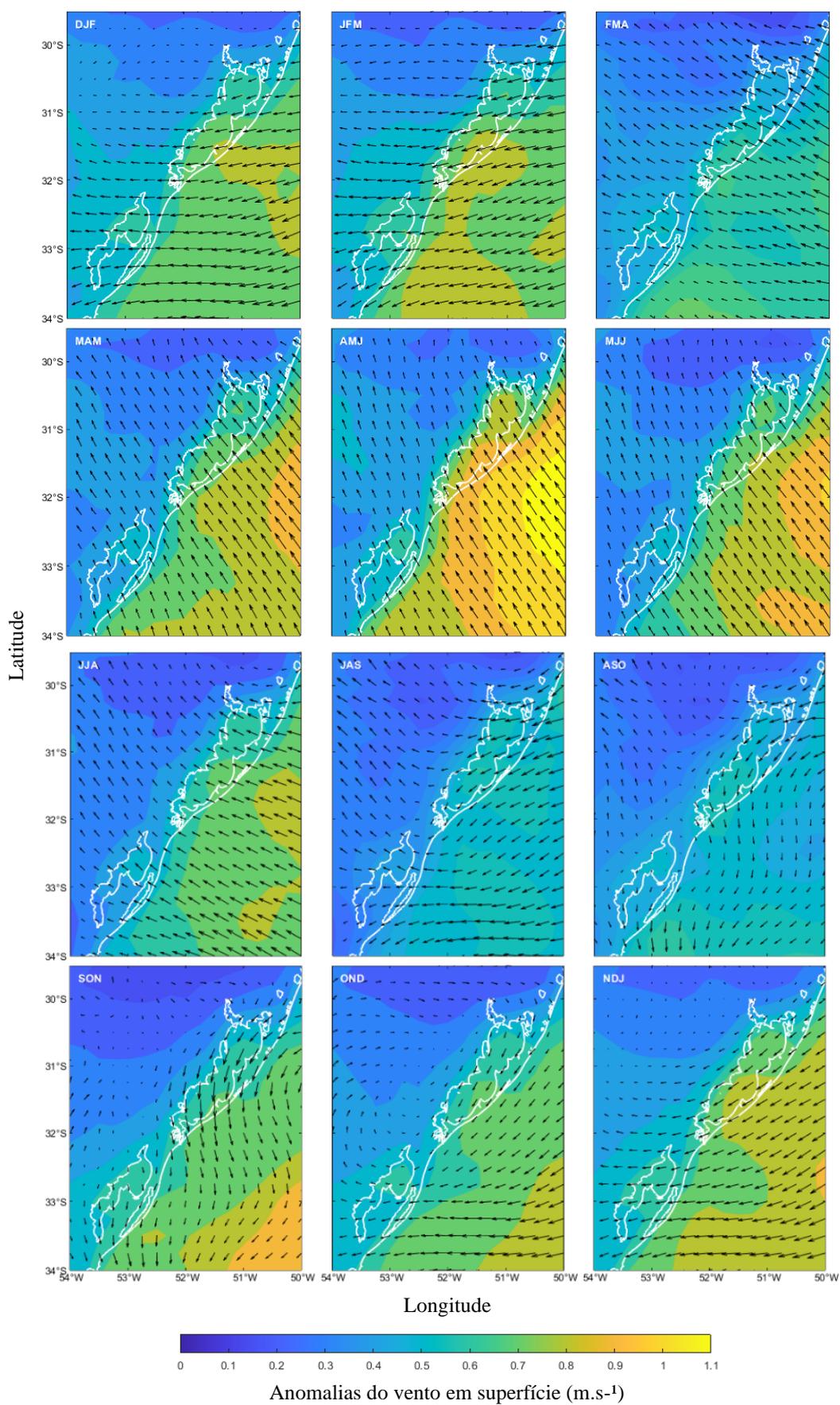


**Figura 9** – Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de El Niño moderado ocorrido na região do Nino 3.4 entre os anos de 1979 a 2021, compreendendo um total de 5 eventos.

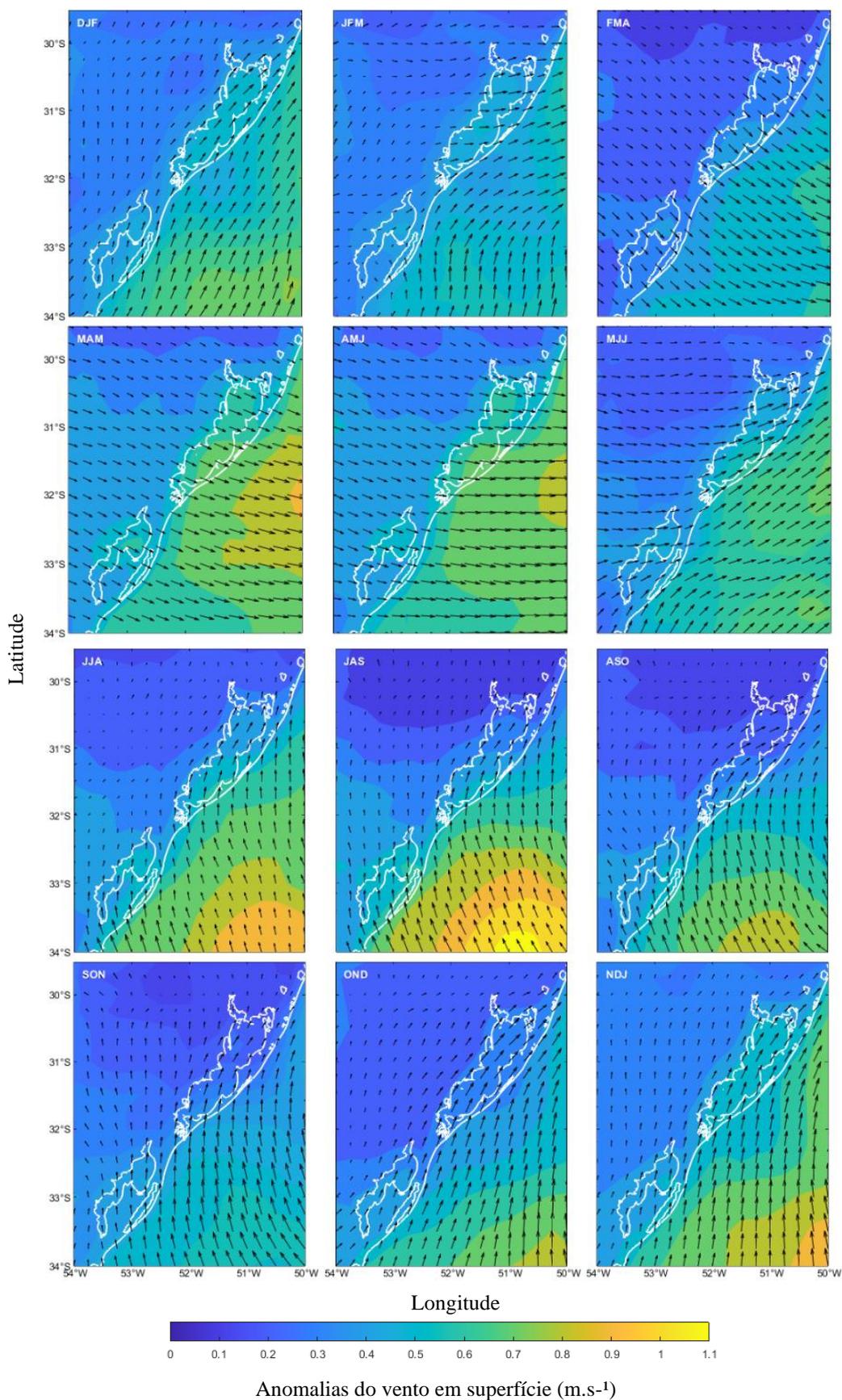
Durante os períodos analisados para La Niña forte (Figura 10) foram registradas variações de velocidade, com valores mínimos de  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  e máximos de  $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ . Durante os primeiros dois trimestres de análise (DJA), há a predominância de ventos de nordeste e uma pequena intensificação dos ventos, que em seguida desaparecem no trimestre seguinte (FMA). Essa intensificação é retomada durante o outono (MAM), com as isolinhas de maior intensidade se deslocando do leste da área oceânica em direção ao continente, alcançando sua máxima velocidade nos meses de AMJ ainda no outono, e predominantes de ventos de sudeste. Esses ventos prevalecerão nos trimestres seguintes, embora com uma diminuição gradual de intensidade, e a mudança de direção a partir do inverno (JAS), quando ocorre uma nova intensificação dos ventos de nordeste na região da Lagoa, persistindo dessa forma entre os períodos de primavera e verão.

Durante o evento de La Niña forte, a região da LP mostra uma prevalência significativa de ventos, principalmente de nordeste, seguidos por ventos de sudeste, os quais exibiram as maiores anomalias positivas na região da LP. Essa dinâmica pode ser explicada pela propensão da LP em sofrer influência de ventos mais intensos durante os períodos de outono e inverno, conforme indicado por Möller et al., 2001. Devido as altas pressões de origem polar que se tornam mais intensas fazendo com que haja permanência da MPA por vários dias consecutivos na região (Sartori, 2003).

Dentre todos os eventos analisados do ENOS para esse estudo, eventos de La Niña moderada (Figura 11) foi a que se mostrou com ventos menos intensos especificamente para região interna da Lagoa dos Patos, com a maior parte dos meses havendo prevalência de valores que não ultrapassaram  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  e ventos do quadrante sul. Para a região os períodos que mostraram algum destaque foram em MAM e AMJ ambos no outono com ventos de noroeste, e uma máxima velocidade onde as anomalias alcançaram  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  em MAM e  $0,7 \text{ m.s}^{-1}$  em AMJ. Há uma máxima intensidade observada durante os meses de JAS, mas que só é observado na região oceânica fora da Lagoa e quando há predominância de ventos sudeste no período do inverno. Rodrigues (2015) destacou em suas análises que anos com menor ocorrência de Sistemas Frontais (SF) na região do RS estão associados principalmente a eventos de La Niña mais fraco, o que pode explicar as anomalias de vento negativas.



**Figura 10** – Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de La Niña forte ocorrido na região do Nino 3.4 entre os anos de 1979 a 2021, compreendendo um total de 5 eventos.



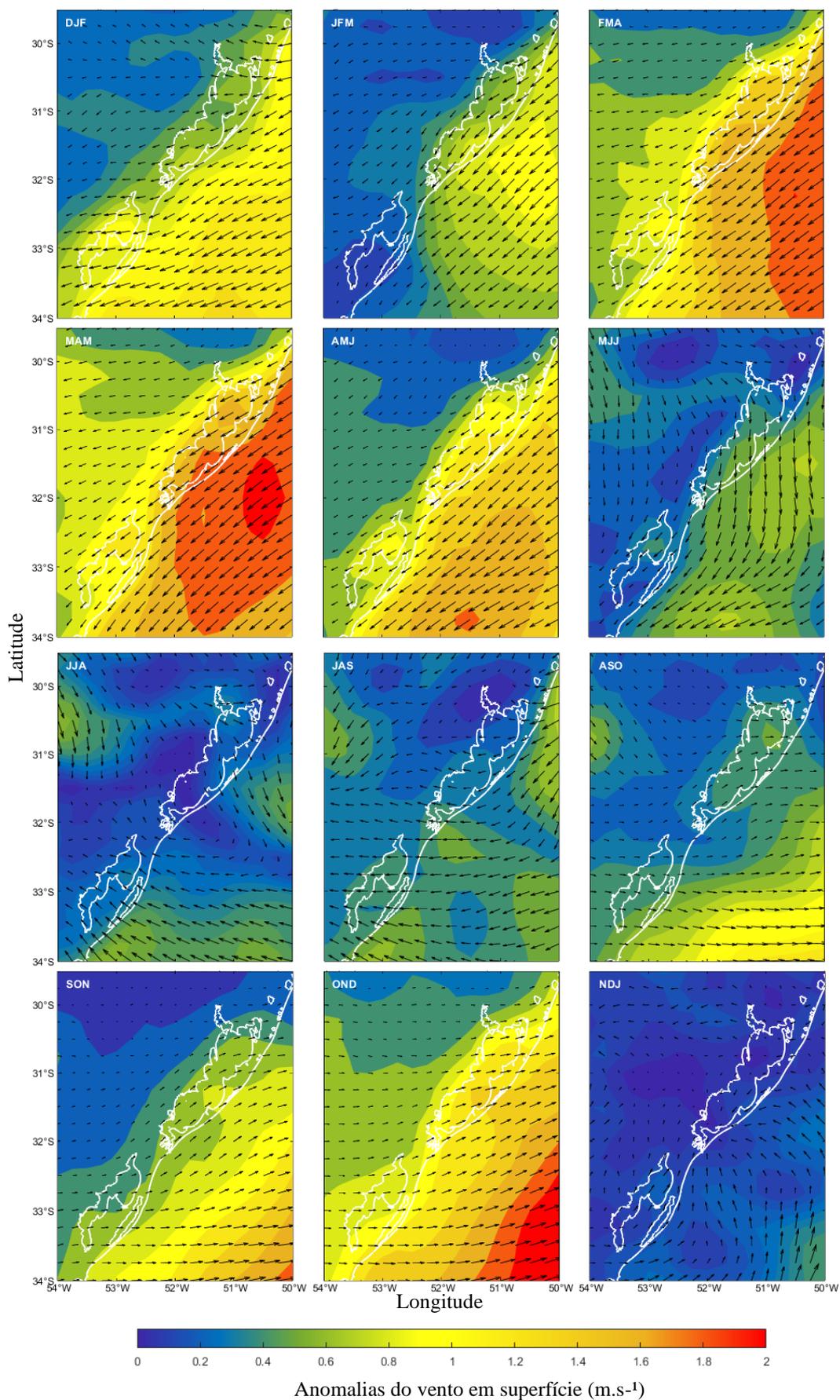
**Figura 11** – Compostos de anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para os anos de La Niña moderado ocorrido na região do Nino 3.4 entre os anos de 1979 a 2021, compreendendo um total de 4 eventos.

#### 4.4 EVENTOS SEVEROS DE VENDAVAIS

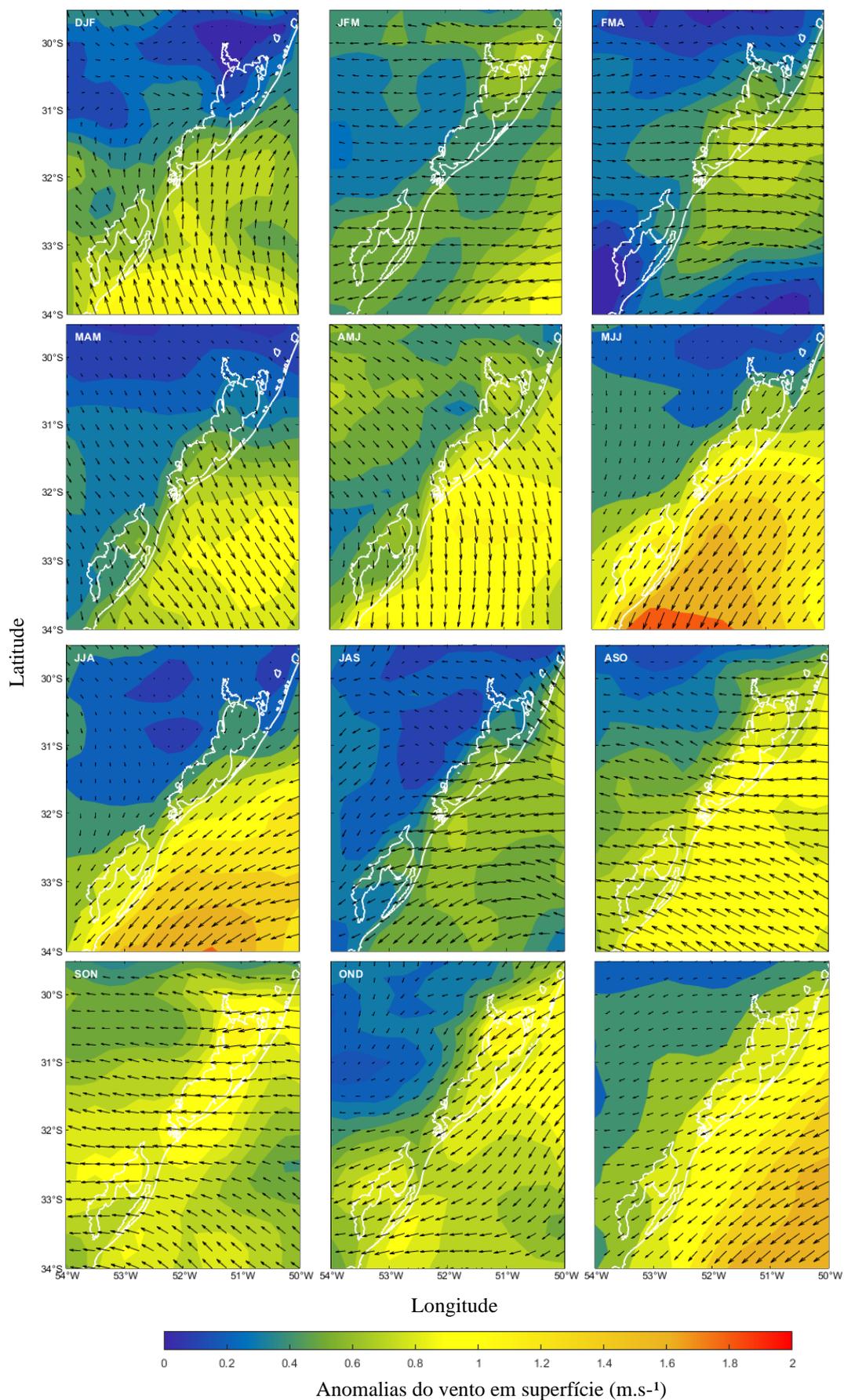
A figura 12 apresenta as anomalias trimestrais de velocidade do vento para o ano de 1982. Apesar de não ter registrado a maior anomalia de TSM nem a duração mais prolongada entre o início e o término do evento (Figura 7), o ano de 1982 se destacou por apresentar o maior número de ocorrências com valores máximos de anomalias na região de estudo (nos trimestres FMA, MAM e AMJ), o que sugere uma dinâmica atmosférica peculiar nesse período. Além disso, foi o ano que mais se destacou em termos de significância das anomalias na região da Lagoa dos Patos, onde se observaram ventos de maior intensidade, com predominância de direção nordeste ao longo dos três eventos analisados.

Essas anomalias positivas do vento durante o ano de 1982 pode ser associada ao evento de El Niño ocorrido nesse período. O El Niño, classificado como severo e posteriormente como forte em 1983, foi identificado como um dos eventos mais catastróficos para o século XX, conforme indicado pelo Senado Federal em 1997, destacando-se em termos de anomalias positivas para esse estudo. Durante esse El Niño extremo, a presença consistente de sistemas frontais na região sul do Brasil foi observada. Em algumas situações, esses sistemas interagiram com vórtices ciclônicos nos altos níveis da troposfera e jatos subtropicais, sendo que alguns desses sistemas frontais permaneceram estacionários sobre a região sul, conforme documentado por Cavalcanti e Gan em 1992. Essa interação contribuiu para as características particulares do ano de 1982 em termos de padrões de precipitação, conforme destacado por Gan e Rao em 1991. Assim, a dinâmica atmosférica peculiar mencionada na análise das anomalias de velocidade do vento pode ser atribuída aos efeitos do El Niño intenso registrado nesse ano específico.

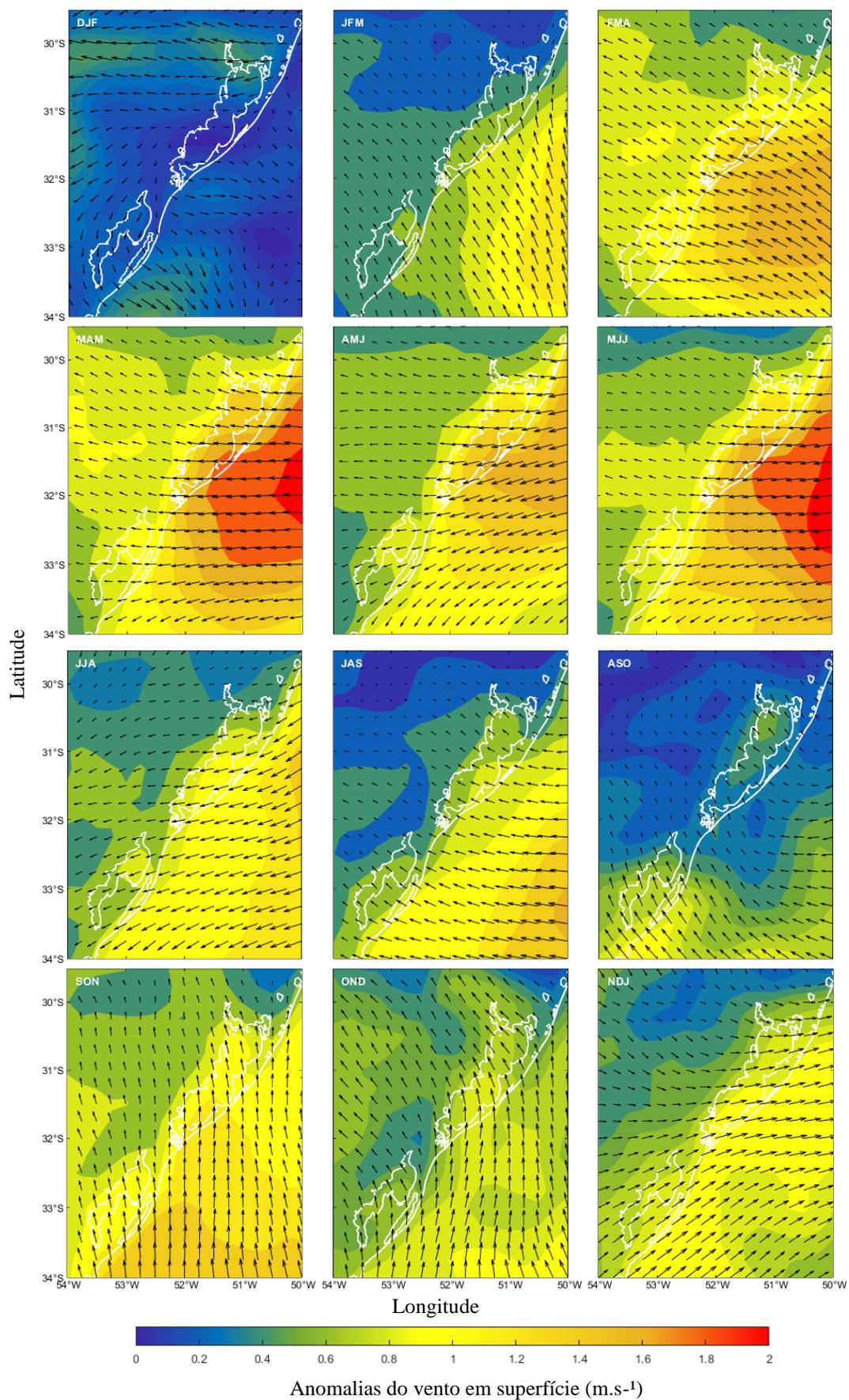
Em 1997 (Figura 13) tivemos um ano com maior destaque de anomalias de temperatura atingindo 2.7 °C (Figura 7). Ao avaliar as variações trimestrais da velocidade do vento, é possível perceber que o seu impacto foi relativamente menor quando comparado aos outros anos. As maiores influências foram observadas nos trimestres de MJJ, JJA e NDJ, com anomalias de 1,79 m.s<sup>-1</sup>, principalmente na área oceânica, sem grandes alterações na região da Lagoa dos Patos. A predominância de ventos nordeste foi observado na maioria dos trimestres destacados. A explicação para ocorrência de anomalias de vento menos expressivas em relação aos outros eventos extremos, reside no fato de que a região Sudeste e Sul do Brasil apresentou um inverno (junho-agosto 1997) ameno e um verão ligeiramente mais rigoroso especialmente em termos de temperatura. Durante o inverno de 1997, as temperaturas estiveram acima da média sobre a Região Sudeste do país e em parte da Região Sul (Oliveira e Satyamurty, 1998).



**Figura 12** – Anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para o ano de El Niño Severo ocorrido na região do Nino 3.4 em 1982.



**Figura 13** – Anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para o ano de El Niño Severo ocorrido na região do Nino 3.4 em 1997.



**Figura 14** – Anomalias trimestrais de velocidade do vento a 10 m para o ano de El Niño Severo ocorrido na região do Nino 3.4 em 2015.

O período de 2015 (Figura 14) apresentou um padrão semelhante ao observado em 1982 com anomalias marcantes, especialmente nos trimestres de FMA. Os picos de anomalias ocorreram durante MAM, AMJ e MJJ, enquanto nos demais trimestres, as variações foram mais suaves. As maiores anomalias para região da LP foram observadas pela alteração do quadrante dos ventos, assemelhando-se aos padrões já observados nessa seção. Durante esses eventos, a predominância dos ventos nordeste, com alguma variação para leste em determinados pontos, exerceu uma influência significativa nas maiores anomalias.

Durante períodos de El Niño, a posição ou a intensidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) pode ser modificada, levando a um aumento nas anomalias de vento de nordeste, como evidenciado nos eventos extremos, especialmente nos anos de 1982 e 2015 conforme abordado neste estudo. A ASAS, caracterizada como um sistema de alta pressão, exerce uma influência significativa nos padrões climáticos da região sul do Brasil, com ventos nordeste sendo comuns na borda noroeste da ASAS. Em uma pesquisa conduzida por Machado et al. (2020), foi observada a atuação de um sistema de baixa pressão com centro entre 30° e 40° S, seguido por um sistema de alta pressão (na retaguarda do ciclone), este último manifestando-se mais próximo ao Rio Grande do Sul durante os meses de abril e maio de 2015. Essas observações permitem associar tais alterações às anomalias positivas encontradas na região de estudo para o mesmo ano.

## 5 CONCLUSÕES

Esse trabalho visou avaliar a climatologia sazonal e interanual dos ventos em superfície na região da Lagoa dos Patos usando a base de dados de reanálise global ERA5, que conseguiu representar bem o regime de ventos durante períodos de ENOS para a região de estudo. Ao analisar a climatologia sazonal e interanual dos ventos em superfície na região da Lagoa dos Patos, verificou-se uma significativa predominância de ventos do quadrante norte, especialmente de nordeste. Os resultados obtidos com a reanálise ERA5 foram validados estatisticamente em comparação com dados da boia SiMCosta, evidenciando uma consistência nas medições, embora tenham sido identificadas valores superestimados de vento em certos períodos.

A classificação das fases e intensidades dos eventos de ENOS revelou que, durante eventos de El Niño forte, há um aumento nas anomalias positivas de vento na região oceânica, especialmente a leste do domínio de estudo. Durante o El Niño moderado, observou-se uma tendência de deslocamento das isolinhas de maior intensidade em direção à costa, indicando um potencial aumento na intensificação da circulação dos ventos sobre a região costeira. Já durante os eventos de La Niña forte, a região da Lagoa dos Patos mostrou uma prevalência significativa de ventos de nordeste e sudeste. A dinâmica sazonal influenciou as anomalias de vento, destacando-se o aumento das anomalias positivas dos ventos do quadrante sul no final do verão e início do outono. A análise de eventos extremos, como vendavais, durante os anos de 1982, 1997 e 2015, indicou que esses eventos estão associados a condições atmosféricas particulares, como ocorrência de El Niño e alterações na posição ou intensidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), justificando a predominância de ventos nordeste durante os períodos de maiores anomalias positivas.

Esses resultados corroboram a tendência que já havia sido observada e documentada pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA) em 2019. Ao longo do tempo, observa-se uma maior ocorrência e intensidade desses padrões climáticos, o que é fundamental para previsões e planejamento de eventos extremos em diversas regiões do globo. Essa maior ocorrência de eventos extremos reforça a importância de monitoramento e estudos sobre o fenômeno El Niño e La Niña.

## REFERÊNCIAS

AHMED, M., AHMAD, S., KHEIR, A. M. (2023). Climate Change: An Overview. Global Agricultural Production: Resilience to Climate Change, 1-30.

AKHSAN, H., IRFAN, M., ISKANDAR, I. (2023). El Niño Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), and the Rise of Extreme Temperatures in Eastern Sumatra: Exploring Climate Change Dynamics. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(2), 600-608.

ALIZADEH, O. (2023). A review of ENSO teleconnections at present and under future global warming. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, e861.

ANDRADE, K. M., CAVALCANTI, I. F. (2004). Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. In Congresso Brasileiro de Meteorologia (Vol. 13).

ANDRADE, K. M. (2005). Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

ANNAMALAI, H., LIU, P., XIE, S. P. (2005). Southwest Indian Ocean SST variability: Its local effect and remote influence on Asian monsoons. *Journal of Climate*, 18(20), 4150-4167.

ARAÚJO, P. H. C., de FIGUEIREDO SILVA, F., GOMES, M. F. M., FÉRES, J. G., BRAGA, M. J. (2014). Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região nordeste do Brasil. *Revista Econômica do Nordeste*, 45(3), 46-57.

BARROS, GP, E MARQUES, WC (2013). Influência dos eventos ENOS no padrão de descarga de água doce na Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. Em Resumos do Encontro de Primavera da AGU (Vol. 2013, pp. OS31B-02).

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. (2003). El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS. 110p.

BERLATO, M. A., FARENZENA, H., & FONTANA, D. C. (2005). Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40, 423-432.

BITENCOURT, L.P., FERNANDES, E.H., SILVA, P.D., MÖLLER, O. (2020). Spatio-temporal variability of suspended sediment concentrations in a shallow and turbid lagoon. *J. Mar. Syst.* 103454. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103454>.

BORTOLIN, E. C., TÁVORA, J., FERNANDES, E. H. (2022). Long-term variability on suspended particulate matter loads from the tributaries of the world's largest choked lagoon. *Frontiers in Marine Science*, 9, 836739.

BRASIL. SENADO FEDERAL. Comissão "El Niño". Relatório Final. Brasília, DF, Setembro de 1997. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=4118692&disposition=inline>

BURKE, M., HSIANG, SM MIGUEL, E., (2015). Efeito não linear global da temperatura na produção económica. *Natureza* 527 , 235–239.

CASTELÃO, R.; MÖLLER, O. O., (2003). Sobre a Circulação Tridimensional Forçada por Ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 25(1): 91–106.

CAVALCANTI, I.F.A. E GAN, M.A. (1992). Anomalous precipitation in Southern Brazil and ENSO events. Apresentado no Workshop sobre o fenômeno ENOS e a variabilidade climática nas escalas sazonal a interanual: Impactos socioeconômicos, previsão e aplicações ao processo de tomada de decisão. Florianópolis.

CAVALCANTI, I. F. D. A., KOUSKY, V. E. (2009). Frentes frias sobre o Brasil. *Tempo e clima no Brasil*, 1, 134-147.

CORIOLOANO, T. R., SIGNORELLI, N. T., JUNIOR, J. L., MOREIRA, M. A. C., DA SILVA, M. G. A. J. (2022). Study of the temporal variation of offshore wind energy potential in southeast Brazil. *Ciência e Natura*, 44, e6-e6.

DIAZ, H. F., HOERLING, M. P., EISCHEID, J. K. (2001). ENSO variability, teleconnections and climate change. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(15), 1845-1862.

FAN, H. et al., (2023). Revisiting Impacts of Tropical Pacific SST Anomalies on Pacific Meridional Mode during the Decay of Strong Eastern Pacific El Niño Events. *Journal of Climate*, p. 1-34.

FERNANDES, E.H.L.; DYER, K.R.; MOLLER, O.O.; NIENCHESKI, L.F.H., (2002). The Patos Lagoon hydrodynamics during El Niño event (1998). *Cont. Shelf Res.*, 22, 1699–1713.

FERNANDES, E.; MARIÑO-TAPIA, I.; DYER, K.; MOLLER, O., (2004). The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary. *Ocean Dynamics*, v. 54, n. 3-4, p. 348-359.

FERNANDES, I. G., PIMENTA, F. M., SAAVEDRA, O. R., SILVA, A. R. (2021). Offshore validation of ERA5 reanalysis with hub height wind observations of Brazil. In 2021 IEEE PES innovative smart grid technologies conference-Latin America (ISGT Latin America) (pp. 1-5). IEEE.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., E SILVA JÚNIOR, J. A. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18(1), 115-146.

FIRPO, M. Â. F., SANSIGOLO, C. A., & ASSIS, S. V. D. (2012). Climatologia e variabilidade sazonal do número de ondas de calor e de frio no Rio Grande do Sul associadas ao ENOS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 95-106.

FONTANA, D. C., BERLATO, M. A. (1997). Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria*, 5(1), 127-132.

GAN, M. A., RAO V. B., 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 19 (5):1293-1302.

GLANTZ, M.H., RICHARD, W.K., NICLHOLLS, N., (1991). Teleconnection linking worldwide climate anomalies. New york; Cambridge University, p 1- 12.

GLYNN, PETER W. et al., (2001). Coral bleaching and mortality in Panama and Ecuador during the 1997–1998 El Niño–Southern Oscillation event: spatial/temporal patterns and comparisons with the 1982–1983 event. *Bulletin of Marine Science*, v. 69, n. 1, p. 79-109.

GRIMM, A. M., FERRAZ, S. E., GOMES, J. (1998). Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, 11(11), 2863-2880.

GRIMM, A. M., BARROS, V. R., DOYLE, M. E. (2000). Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, 13(1), 35-58.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. (2006). Episódios El NIÑO e LA NIÑA e a frequência de eventos extremos de precipitação no Brasil: análise no litoral da região sul. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, SC.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD). (2023). 1º volume de boletins sobre os efeitos do El Niño no Brasil nos anos de 2023 e 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/painel-el-nino/el-nino-boletim-mensal>

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

IZUMO, T., VIALARD, et al., (2010). Influence of the state of the Indian Ocean Dipole on the following year's El Niño. *Nature Geoscience*, 3(3), 168-172.

JEONG, H. et al., (2022). Distinct impacts of major El Niño events on Arctic temperatures due to differences in eastern tropical Pacific sea surface temperatures. *Science Advances*, v. 8, n. 4, p. eabl8278.

KJERFVE, B., (1986). Circulation and Salt Flux in a Well Mixed Estuary. Em: VAN DE KREEKE, J. (ed.). *Physics of Shallow Estuaries and Bays*. Berlin, Spring-Verlag, 22–29 p.

LIU, Y., CAI, W., LIN, X., LI, ZHANG, Y. (2023). Nonlinear El Niño impacts on the global economy under climate change. *Nature Communications*, 14(1), 5887.

LOPES, F. Z., DINIZ, G. B., & MARQUES, J. R. (2007). Relação entre o Multivariate Enso Index (MEI) e a TSM das regiões dos niños com a precipitação em regiões homogêneas do Estado do Rio Grande do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*, 30(2), 11-22.

MACHADO, J. P., MIRANDA, G. S. B., GOZZO, L. F., CUSTÓDIO, M. D. S. (2020). Condições atmosféricas associadas a eventos de ressaca no litoral sul e do sudeste do Brasil durante o El Niño 2015/2016. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34, 529-544.

MARQUES, W. C., (2005). Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação(mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto de Oceanografia, 2005. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/3502>.

MATZENAUER, R., RADIN, B., MALUF, J. R. T. (2018). O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. *Agrometeoros*, 25(2).

MÖLLER, O. O.; PAIM, P. S. ; SOARES, I. D. (1991). Facteurs et mecanismes de la circulation des eaux dans l'estuaire de la Lagune dos Patos (RS, Bresil). *Bull. Inst. Geologie Basin D'aquitaine*, Bordeaux - França, v. 49, p. 15-28.

MÖLLER, O., (1996). Hydrodynamique de la lagune dos Patos (30°S, Brésil): mesures et modélisation. Tese de Doutorado. França, Universidade de Bordeaux 1, 204p

MÖLLER, O.; LORENZZETTI, J.; STECH J.; MATA, M. , (1996). The Summertime Circulation and Dynamics of Patos Lagoon. *Continental Shelf Research*, 16:355–351.

MÖLLER, O.; CASTING, P.; SALOMON, J.; LAZURE, P. , (2001). The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24(2):297–311.

NEDEL, A., SAUSEN, T. M., SAITO, S. M. (2012). Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 1989-2009: Granizo e vendaval. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 119-126.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), (2019a). Cold and warm episodes by season. [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Acesso em: 23 de julho de 2022.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), (2019b). Nino regions. [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/nino\\_regions.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml). Acesso em: 23 de julho de 2022.

NOAA (National Centers for Environmental Information, Monthly National Climate) Report for November 2023, published online December 2023. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/national/202311>. Acesso em: 5 de dezembro de 2023.

OLIVEIRA, G. S., SATYAMURTY, P. (1998). O El Niño de 1997/98: evolução e impactos no Brasil.

PAMPUCH, L. A., AMBRIZZI, T. (2015). Características sinóticas e dinâmicas de períodos extremos secos sobre o sudeste do Brasil e sua relação com a TSM do Atlântico Sul.

PEREIRA, H. R., REBOITA, M. S., AMBRIZZI, T. (2017). Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 293-310.

REIS, B. L. R. DOS. (2021). Regime e Variabilidade de Ondas Superficiais de Gravidade na Região do Oceano Atlântico Equatorial Ocidental Adjacente ao Litoral Maranhense. Trabalho de Conclusão de Curso, UFMA, São Luis, Maranhão.

RODRIGUES, B. D. (2015). Comportamento dos sistemas frontais no estado do Rio Grande do Sul durante os episódios ENOS.

ROPELEWISKY, C.F., HALPERT, M.S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/ Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, v. 115, p. 1606-1626.

ROPELEWISKY, C.F. HALPERT, M.S. (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the southern oscillation. *J. Climate*, Boston, v. 2, p. 268-284.

SADHU, D. B., 1981. Estudos sobre Energia Eólica, Dep. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SARTORI, M. D. G. B. (2003). A dinâmica do clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. *Terra livre*, (20), 27-50.

TÁVORA, J., FERNANDES, E. H., BITENCOURT, L. P., OROZCO, P. M. S. (2020). El-Niño southern oscillation (enso) effects on the variability of patos lagoon suspended particulate matter. *Regional Studies in Marine Science*, 40, 101495.

TIMMERMANN, A. et al., (2018). El Niño–Southern Oscillation complexity. *Nature*, v. 559, n. 7715, p. 535

TRENBERTH, K. E. (1990). Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(7), 988-993.

TRENBERTH, K. E., STEPANIAK, D. P. (2001). Indices of el Niño evolution. *Journal of climate*, 14(8), 1697-1701.

UBILAVA, D.; ABDOLRAHIMI, M., (2019). The El Niño impact on maize yields is amplified in lower income teleconnected countries. *Environmental Research Letters*, v. 14(5), p. 054008.

VALENTE, P. T. (2022). Influência do Enso, Sam e Psa na precipitação do sudeste da América do Sul de 1951 a 2020.

VALENTE, P.T., VIANA, D.R., AQUINO, F.E., SIMÕES, J.C. (2023). Classificação das anomalias de precipitação no Rio Grande do Sul em eventos ENSO no século XX. *Sociedade & Natureza*, 35 .

WALSTRA, D. J. R., ROELVINK, J. A., Groeneweg, J. (2001). Calculation of wave-driven currents in a 3D mean flow model. In *Coastal Engineering 2000* (pp. 1050-1063).

ZONG, J. M., WANG, X. X., ZHONG, Q. Y., XIAO, X. M., MA, J., ZHAO, B. (2019). Increasing outbreak of cyanobacterial blooms in large lakes and reservoirs under pressures from

climate change and anthropogenic interferences in the middle–lower Yangtze River basin. *Remote Sensing*, 11(15), 1754.