


ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO NO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS VIA SENSORIAMENTO REMOTO (2018–2019)

ANALYSIS OF SUSPENDED SOLIDS VARIABILITY IN THE PATOS LAGOON ESTUARY USING REMOTE SENSING (2018–2019)

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LOS SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN EL ESTUARIO DE LAGOA DOS PATOS MEDIANTE TELEDETECCIÓN (2018-2019)

 <https://doi.org/10.56238/arev7n10-005>

Data de submissão: 05/09/2025

Data de publicação: 05/10/2025

Isadora Bicho Emmendorfer

Mestre em Oceanologia

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Email: emmendorferisadora@gmail.com

Dinalva Aires de Sales

Doutora em Física

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

dsales@furg.br

Jean Marcel de Almeida Espinoza

Doutor em Sensoriamento Remoto

Instituição: Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

jean.espinoza@ifsc.edu.br

Bento Almeida Gonzaga

Mestre em Gerenciamento Costeiro

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Email: profbentoag@gmail.com

Victor Hugbo Lessa Rosolem

Mestre em Modelagem Computacional

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Email: vlessarosolem@gmail.com

RESUMO

O crescimento populacional e as atividades antrópicas comprometem a qualidade da água em regiões costeiras, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo, conforme estabelecido pela Resolução nº357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Este estudo teve como área de estudo o estuário da Lagoa dos Patos, ecossistema de elevada importância ecológica e socioeconômica, influenciado tanto por efluentes urbanos e industriais da cidade do Rio Grande quanto por variabilidades climáticas. Fenômenos como El Niño e La Niña afetam a precipitação, a salinidade, a temperatura e a dinâmica estuarina, refletindo-se em mudanças nos parâmetros de qualidade da água, como o Total de Sólidos em Suspensão (TSS). A pesquisa concentrou-se no período de 2018–2019, marcado por um El Niño moderado que gerou anomalias sazonais. Os resultados indicaram um outono mais quente do que o verão (21,03 °C vs. 20,83 °C), inverno com ventos intensos ($\geq 7,60$ m/s), mesmo sob alta pressão

atmosférica ($\geq 1022,73$ hPa) e precipitação extrema no outono (~ 909 mm). Tais variações promoveram alterações na qualidade da água, evidenciadas por picos de TSS (≥ 36 mg/L) no verão, associados à ressuspensão de sedimentos induzida por ventos e ao aporte de nutrientes decorrente das chuvas. Esses resultados ressaltam a sensibilidade do estuário a eventos climáticos extremos e demonstram a eficácia da modelagem espacial centrada em dados de sensoriamento remoto como ferramenta para o monitoramento em larga escala de sólidos em suspensão.

Palavras-chave: SENTINEL -2. QGIS. NCEP/ DOE Reanalysis II.

ABSTRACT

Population growth and anthropogenic activities compromise water quality in coastal regions, reinforcing the need for continuous monitoring, as established by Resolution N° 357 of the National Environmental Council. The study area was the Patos Lagoon estuary, an ecosystem of high ecological and socioeconomic importance, influenced both by urban and industrial effluents from the city of Rio Grande and by climatic variability. Phenomena such as El Niño and La Niña affect precipitation, salinity, temperature, and estuarine dynamics, resulting in changes in water quality parameters such as Total Suspended Solids (TSS). The research focused on the period of 2018–2019, marked by a moderate El Niño event that generated seasonal anomalies. Results indicated a warmer autumn compared to summer (21.03 °C vs. 20.83 °C), a winter with strong winds (≥ 7.60 m/s) even under high atmospheric pressure (≥ 1022.73 hPa), and extreme autumn precipitation (~ 909 mm). Such variations promoted changes in water quality, evidenced by TSS peaks (≥ 36 mg/L) in summer, associated with wind-induced sediment resuspension and nutrient input from rainfall. These findings highlight the estuary's sensitivity to extreme climatic events and demonstrate the effectiveness of spatial modeling based on remote sensing data as a tool for large-scale monitoring of suspended solids.

Keywords: SENTINEL -2. QGIS. NCEP/ DOE Reanalysis II.

RESUMEN

El crecimiento poblacional y las actividades humanas comprometen la calidad del agua en las regiones costeras, lo que refuerza la necesidad de un monitoreo continuo, según lo establecido por la Resolución No. 357 del Consejo Nacional del Medio Ambiente. Este estudio se centró en el estuario de Lagoa dos Patos, un ecosistema de alta importancia ecológica y socioeconómica, influenciado por los efluentes urbanos e industriales de la ciudad de Rio Grande do Sul y la variabilidad climática. Eventos como El Niño y La Niña afectan la precipitación, la salinidad, la temperatura y la dinámica estuarina, lo que resulta en cambios en parámetros de calidad del agua como los sólidos suspendidos totales (SST). La investigación se centró en el período 2018-2019, marcado por un El Niño moderado que generó anomalías estacionales. Los resultados indicaron un otoño más cálido que el verano ($21,03$ °C frente a $20,83$ °C), un invierno con fuertes vientos ($\geq 7,60$ m/s), incluso bajo alta presión atmosférica ($\geq 1022,73$ hPa), y precipitaciones extremas en el otoño (~ 909 mm). Estas variaciones propiciaron cambios en la calidad del agua, evidenciados por un nivel máximo de sólidos en suspensión (≥ 36 mg/L) en verano, asociado con la resuspensión de sedimentos inducida por el viento y el aporte de nutrientes de la lluvia. Estos resultados resaltan la sensibilidad del estuario a los fenómenos meteorológicos extremos y demuestran la eficacia del modelado espacial basado en datos de teledetección como herramienta para el monitoreo a gran escala de sólidos en suspensión.

Palabras clave: SENTINEL-2. QGIS. Reanálisis II del NCEP/DOE.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os ambientes costeiros e estuarinos vêm sendo alvo de crescentes pressões antrópicas, impulsionadas pelo avanço da urbanização, da industrialização e da exploração dos recursos naturais. Esses sistemas, que compreendem áreas de transição entre os ecossistemas terrestres e marinhos, concentram elevada biodiversidade e desempenham funções ecológicas essenciais, como a regulação de ciclos biogeoquímicos, o amortecimento de inundações, e a sustentação da pesca artesanal e industrial. Além disso, as zonas costeiras e estuarinas abrigam densos contingentes populacionais, configurando-se como espaços estratégicos para o desenvolvimento socioeconômico da região. Contudo, essa importância ecológica e econômica contrasta com a crescente vulnerabilidade desses ecossistemas, decorrente da intensificação das atividades humanas e da amplificação dos efeitos das mudanças climáticas globais (MASSON-DELMOTTE *et al.*, 2021).

Um dos principais desafios ambientais enfrentados nessas regiões é a degradação da qualidade da água. Processos como a descarga de efluentes domésticos e industriais, a intensificação da agricultura, a expansão de portos e a dragagem de canais, alteram profundamente a composição físico-química da água e a hidrodinâmica local, provocando elevação de nutrientes, aumento de sólidos suspensos e, por consequência, a diminuição da transparência. Esses fatores comprometem a produtividade primária, ameaçam a biodiversidade aquática e reduzem a qualidade dos serviços ecossistêmicos relacionados, afetando diretamente o bem-estar humano. Nesse sentido, legislações ambientais, como a Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelecem critérios para classificação e monitoramento dos corpos d'água no Brasil, enfatizando a necessidade de avaliações contínuas e metodologicamente robustas (BRASIL, 2005).

No cenário internacional, diversos estudos têm destacado a relevância do monitoramento sistemático de variáveis ambientais em estuários e lagunas costeiras. A vulnerabilidade desses ambientes é acentuada pela sua posição de interface, onde se sobrepõem forçantes continentais, atmosféricas e oceânicas. Entre as variáveis mais investigadas, o Total de Sólidos em Suspensão (TSS) ocupa papel central, pois está diretamente associado à dinâmica sedimentar, à turbidez da água e ao transporte de nutrientes e contaminantes (GHOLIZADEH, MELESSE & REDDI, 2016). Alterações na concentração de TSS refletem tanto processos naturais, como as variações sazonais de descarga fluvial e regimes de vento, quanto as pressões antrópicas relacionadas à poluição e ao uso inadequado do solo.

No Brasil, o estuário da Lagoa dos Patos, localizado no sul do Rio Grande do Sul, representa um caso emblemático dessa complexa interação de fatores. Com cerca de 265 km de extensão e conectado ao oceano Atlântico por um estreito canal, esse sistema lagunar é um dos maiores do mundo

em volume e área superficial. A hidrodinâmica da Lagoa dos Patos é regulada por múltiplos fatores, incluindo ventos sazonais, descargas fluviais e marés (astronômicas e de tempestade), que interagem de forma não linear e resultam em padrões espaciais e temporais altamente variáveis de salinidade, turbidez e produtividade primária (FERNANDES, DYER & MOLLER, 2005; FERNANDES, MONTEIRO & MOLLER JR., 2010.). Além disso, a presença da cidade do Rio Grande, sendo importante polo industrial, portuário e pesqueiro, ajuda a intensificar os aportes de efluentes domésticos e industriais, elevando as concentrações de matéria orgânica e nutrientes no sistema (BAUMGARTEN & PAIXÃO, 2013).

Esse conjunto de pressões locais é potencializado pela variabilidade climática interanual, especialmente pelos fenômenos El Niño e La Niña, que afetam diretamente o regime pluviométrico local, a temperatura e os padrões de circulação atmosférica na América do Sul. Durante eventos de El Niño, é comum o aumento da precipitação nas bacias tributárias da Lagoa dos Patos e, conseqüentemente, do aporte de água doce para o estuário, o que altera a salinidade e favorece processos de estratificação. Em contrapartida, episódios de La Niña tendem a reduzir as chuvas nessas mesmas bacias, promovendo maior intrusão marinha e intensificando a salinização das águas lagunares. Ambos os fenômenos influenciam diretamente a distribuição de sólidos suspensos e nutrientes, modulando a produtividade biológica e impactando atividades econômicas como a pesca (MÖLLER & FERNANDES, 2010).

Considerando essa complexidade, o monitoramento contínuo da qualidade da água no estuário da Lagoa dos Patos constitui um desafio logístico e metodológico. A coleta de dados *in situ*, embora essencial, apresenta limitações de cobertura espacial e temporal, além de elevados custos operacionais. Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para complementar os métodos tradicionais. Os dados dos sensores MSI a bordo dos satélites SENTINEL-2 (A e B), disponibilizados gratuitamente pela Agência Espacial Europeia (ESA), possibilitam análises espaço-temporais em alta resolução espacial (i.e., 10 m por pixel) e temporal (revisita ≤ 4 dias), permitindo estimar parâmetros ambientais de forma ágil e precisa. Aliado a técnicas de geoprocessamento e ao uso de dados meteorológicos de reanálise, esse recurso oferece uma abordagem abrangente para investigar padrões sazonais e compreender a resposta do sistema a eventos climáticos extremos.

Estudos anteriores já demonstraram a eficácia do sensoriamento remoto para estimar concentrações do Total de Sólidos em Suspensão em diferentes ecossistemas aquáticos, utilizando equações empíricas baseadas em índices espectrais (PEIXOTO, GUASSELLI & PEREIRA FILHO, 2018; PAHLEVAN ET AL., 2019). Contudo, ainda são escassos os trabalhos que aplicam essa

metodologia de forma integrada em ambientes estuarinos da América do Sul, especialmente em contextos marcados pela influência de eventos climáticos como o El Niño de 2018–2019. A investigação desse período é particularmente relevante, pois o fenômeno, de intensidade moderada, gerou anomalias significativas nos padrões de precipitação, temperatura e ventos no sul do Brasil, oferecendo uma oportunidade única para avaliar como tais alterações repercutem sobre os sólidos suspensos e, conseqüentemente, sobre a qualidade da água.

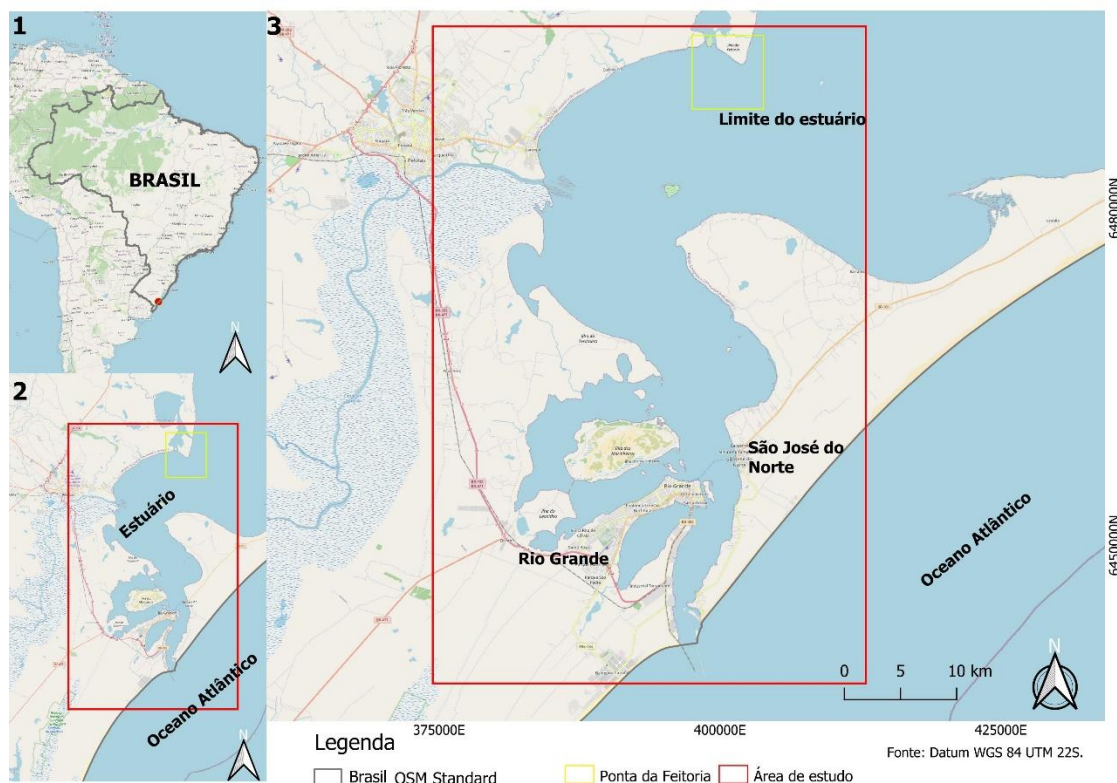
Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar a variabilidade sazonal dos sólidos totais em suspensão (TSS) no estuário da Lagoa dos Patos durante o ano de 2019, em associação ao evento El Niño de 2018–2019. Para tanto, foram utilizadas imagens do satélite MSI/SENTINEL-2, processadas por meio de técnicas de geoprocessamento, em conjunto com dados meteorológicos de reanálise da NOAA-NCEP. Pretende-se, assim, ampliar o entendimento da dinâmica dos sólidos em suspensão no estuário da Lagoa dos Patos por meio da realização desse estudo no período de 2018–2019. Parte dos resultados aqui apresentados foi previamente discutida em formato reduzido durante o XII Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional do Rio Grande do Sul (ERMAC-RS 2025).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho foi desenvolvido no estuário da Lagoa dos Patos, localizado no extremo sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul. A Lagoa dos Patos possui cerca de 265 km de extensão, conectando-se ao Oceano Atlântico por meio de um estreito canal na cidade do Rio Grande, onde esse sistema constitui um dos maiores corpos lagunares do mundo. A área de estudo apresenta elevada relevância ecológica e socioeconômica, sendo responsável por sustentar atividades pesqueiras, portuárias e industriais. Sua dinâmica é controlada por interações complexas entre descargas fluviais, marés e os ventos, configurando um ambiente de alta variabilidade espaço-temporal (MÖLLER & FERNANDES, 2010).

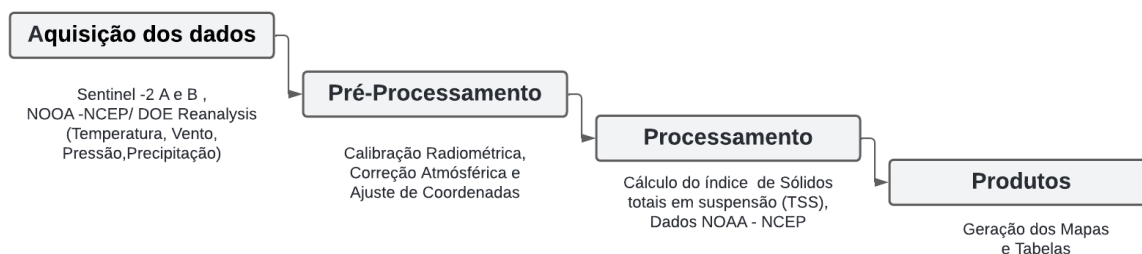
Figura 1. Localização da área de estudo.



Fonte: autores.

As etapas metodológicas podem ser sintetizadas pelo fluxograma (Figura 2), onde a aquisição dos dados constitui-se da Seleção e download das imagens MSI/SENTINEL-2 para o ano de 2019 e da obtenção dos produtos de reanálise *NCEP/DOE Reanalysis II* (para os anos de 2018-2019). Posteriormente, foi realizada o pré-processamento das imagens e cálculo do índice de TSS. Em seguida, foram tratados os dados de reanálise e feita a integração e análise comparativa dos dados.

Figura 2. Fluxograma metodológico dos passos desenvolvidos neste trabalho.



Fonte: Metado de cada imagem (Copernicus).

2.2 OBTENÇÃO DOS DADOS SENSORIAMENTO REMOTO E PRÉ-PROCESSAMENTO

Para o monitoramento dos sólidos totais em suspensão (TSS), foram utilizadas imagens multiespectrais do sensor MSI, satélite SENTINEL-2, disponibilizadas gratuitamente pela Agência Espacial Europeia (ESA) por meio da plataforma *Copernicus Open Access Hub*. Foram selecionadas quatro cenas representativas das estações do ano de 2019 (i.e., verão, outono, inverno e primavera), com o objetivo de capturar a variabilidade sazonal do sistema (Tabela 1). A escolha desse período deve-se à ocorrência do fenômeno El Niño no período 2018–2019, de intensidade moderada, cujos efeitos climáticos se estenderam ao longo do ano analisado. As imagens escolhidas pertencem ao produto SENTINEL-2-MSI (Multispectral Instrument), que fornece resolução espacial de 10 a 20 metros em diferentes bandas espectrais. Dentre elas, destaca-se a banda B5 (comprimento de onda central de 705 nm), localizada na faixa do infravermelho próximo, cuja resposta espectral mostrou-se sensível à estimativa do total de Sólidos em Suspensão em estudos anteriores. O pré-processamento das imagens foi realizado no software QGIS, utilizando o *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP). Nessa etapa, foram aplicadas as correções radiométricas e atmosféricas, além de ajustes geométricos para garantir a comparabilidade entre diferentes datas. Foram gerados dois produtos: (i) reflectância no topo da atmosfera (TOA) e (ii) reflectância de superfície (*Bottom of Atmosphere*, BOA), esta última utilizada como base para os cálculos espectrais aqui aplicados.

Tabela 1. Características das imagens dos satélites da série SENTINEL-2 escolhidas para processamento dos sólidos totais em suspensão (TSS).

Satélite	Sensor	Nível de processamento	Data	Hora (UTC)
S2B	MSI	L1C	2019-03-21	13:22
S2A	MSI	L1C	2019-08-03	13:31
S2B	MSI	L1C	2019-11-06	13:22
S2A	MSI	L1C	2019-12-24	13:31

Fonte: Copernicus (Metadado de cada imagem).

2.3 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA: TOTAL DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (TSS)

A estimativa de TSS foi obtida a partir de equação empírica previamente validada para ambientes aquáticos brasileiros, proposta por PEIXOTO, GUASSELLI E PEREIRA FILHO (2018). A equação, baseada na resposta espectral da banda B5, é expressa da seguinte forma:

$$TSS = Abs \left[\frac{\ln\left(\frac{B5}{C1}\right)}{C2} \right] \quad (1)$$

em que **B5** corresponde à reflectância de superfície na banda do infravermelho próximo, e **C1** e **C2** são constantes ajustadas empiricamente para estimar a concentração de sólidos suspensos em mg/L. O

cálculo foi realizado por meio da ferramenta *Raster Calculator* do QGIS, gerando mapas de distribuição espacial de TSS para cada estação do ano analisada.

2.4 DADOS METEOROLÓGICOS

Com o intuito de relacionar as variações de TSS às condições atmosféricas e hidrodinâmicas, foram incorporados ao estudo dados meteorológicos de reanálise provenientes do *NCEP/DOE Reanalysis II*, disponibilizados pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Foram extraídas variáveis de precipitação, pressão atmosférica reduzida ao nível do mar, temperatura do ar e componentes zonal e meridional do vento (u e v , respectivamente), correspondentes às coordenadas mais próximas da área de estudo (latitude -31.42° , longitude -52.50°), esses dados foram selecionados para os anos de 2018 e 2019, abrangendo o período de desenvolvimento do evento El Niño e sua posterior influência no regime climático regional. Para cada estação do ano, foram calculadas médias sazonais e desvios-padrão, permitindo avaliar a intensidade das anomalias climáticas e compará-las com os padrões históricos descritos na literatura. Posteriormente, foi calculada a magnitude do vento, onde foi obtida pela combinação das componentes u (zonal) e v (meridional), segundo a equação:

$$\text{Magnitude do vento } (M) = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

Onde, M representa a velocidade resultante do vento em metros por segundo (m/s).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

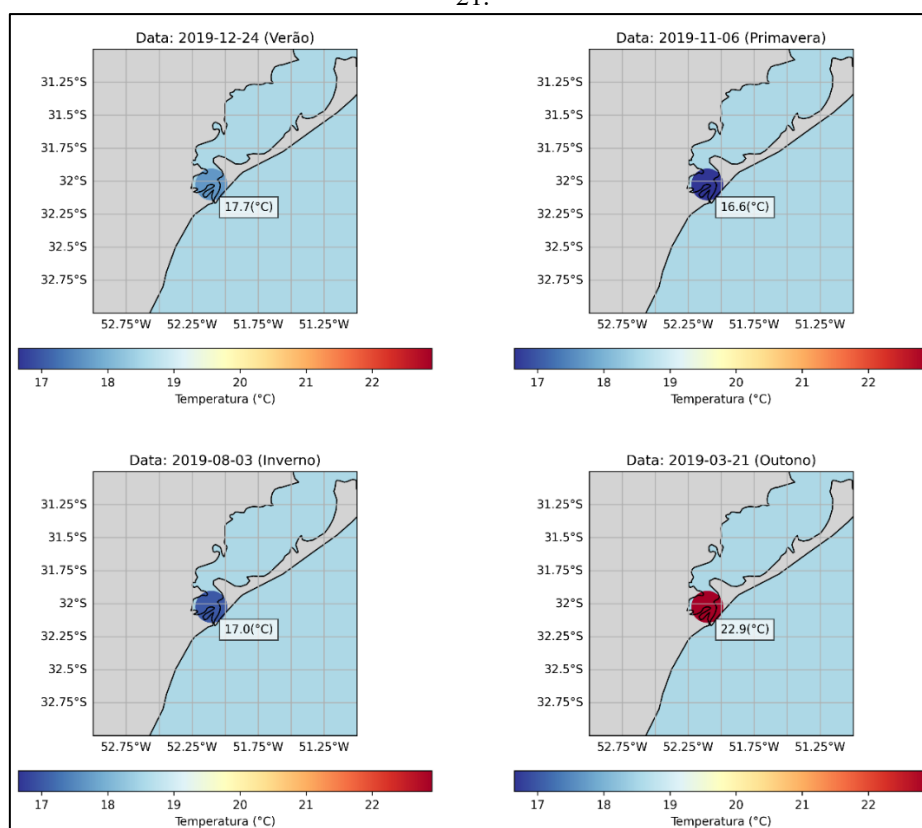
A análise dos dados meteorológicos de 2018-2019 evidenciou anomalias sazonais fortemente associadas ao evento El Niño moderado de 2018–2019. A temperatura média do ar apresentou comportamento atípico, com valores mais elevados no outono ($21,03^\circ\text{C}$) do que no verão ($20,83^\circ\text{C}$), (Tabela 2). Esse padrão contraria a sazonalidade climatológica da região, na qual o verão geralmente apresenta as maiores temperaturas. Estudos anteriores já haviam demonstrado que episódios de El Niño podem induzir a persistência de massas de ar quente e úmido, prolongando o aquecimento em estações de transição (CAI et al., 2020). Em contrapartida, quando observamos os valores pontuais para temperatura (Figura 3), sincronizadas as datas das imagens de satélite, observamos que a imagem de outono corresponde a maior temperatura ($22,9^\circ$).

Tabela 2. Médias e desvios padrões para a temperatura e pressão por estação do ano, para o período de 2018-2019.

Estação	Temperatura		Pressão	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio padrão
Verão	20,83	1,79	1020,23	3,76
Outono	21,03	1,70	1019,56	4,47
Inverno	17,54	1,42	1022,73	6,15
Primavera	16,97	1,05	1021,59	5,11

Fonte: Dados obtidos pela NOAA- NCEP/ DOE Reanalysis II.

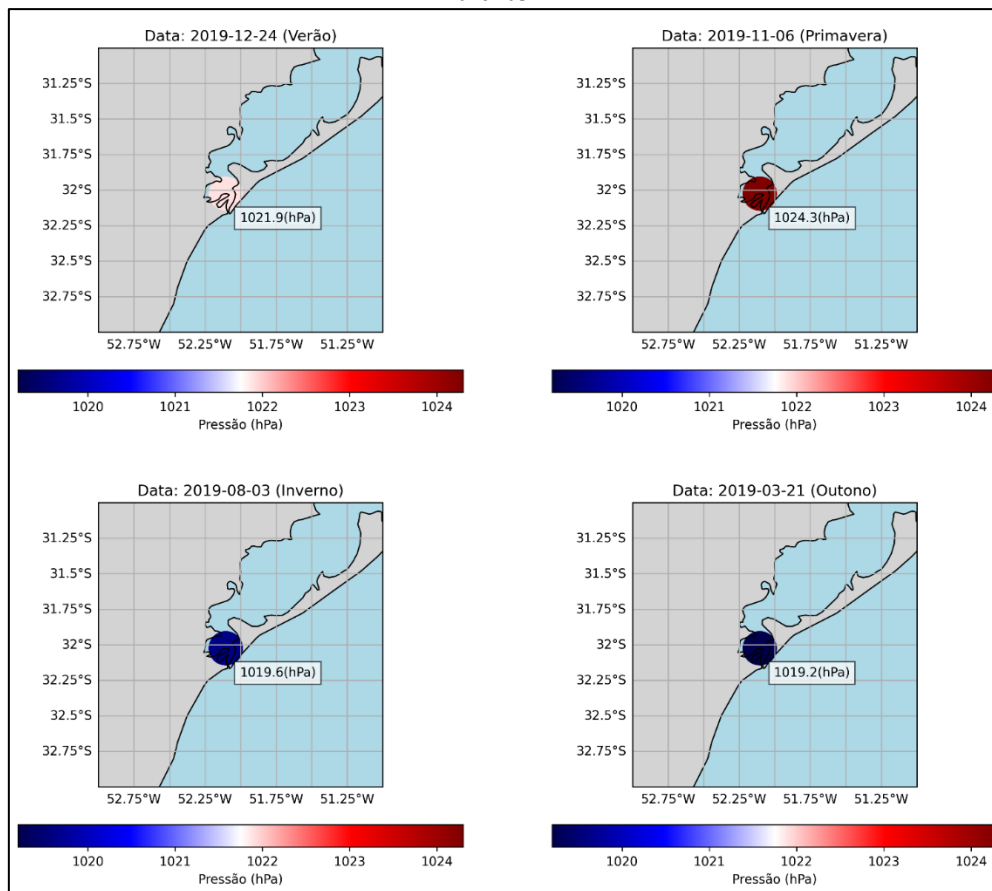
Figura 3. Valor pontual da temperatura para as datas correspondentes: 2019-12-24, 2019-11-06, 2019-08-03 e 2019-03-21.



Fonte: Dados obtidos pela NOAA- NCEP/ DOE Reanalysis II.

No inverno, embora a pressão atmosférica média tenha sido a mais elevada (~1022,7 hPa, Tabela 2), observou-se simultaneamente intensificação dos ventos (7,60 m/s, Tabela 3), o que sugere a influência de sistemas frontais associados à variabilidade climática do Pacífico. FERNANDES et al. (2002), ao investigarem o El Niño de 1998, já haviam relatado a ocorrência de anomalias semelhantes, caracterizadas por episódios de alta pressão acompanhados de ventos intensos, fenômeno que altera significativamente a circulação estuarina. Entretanto, quando observamos os valores pontuais de pressão atmosférica, correspondentes as datas das imagens de satélite, percebe-se que o outono e inverno apresentam as menores pressões (Figura 4).

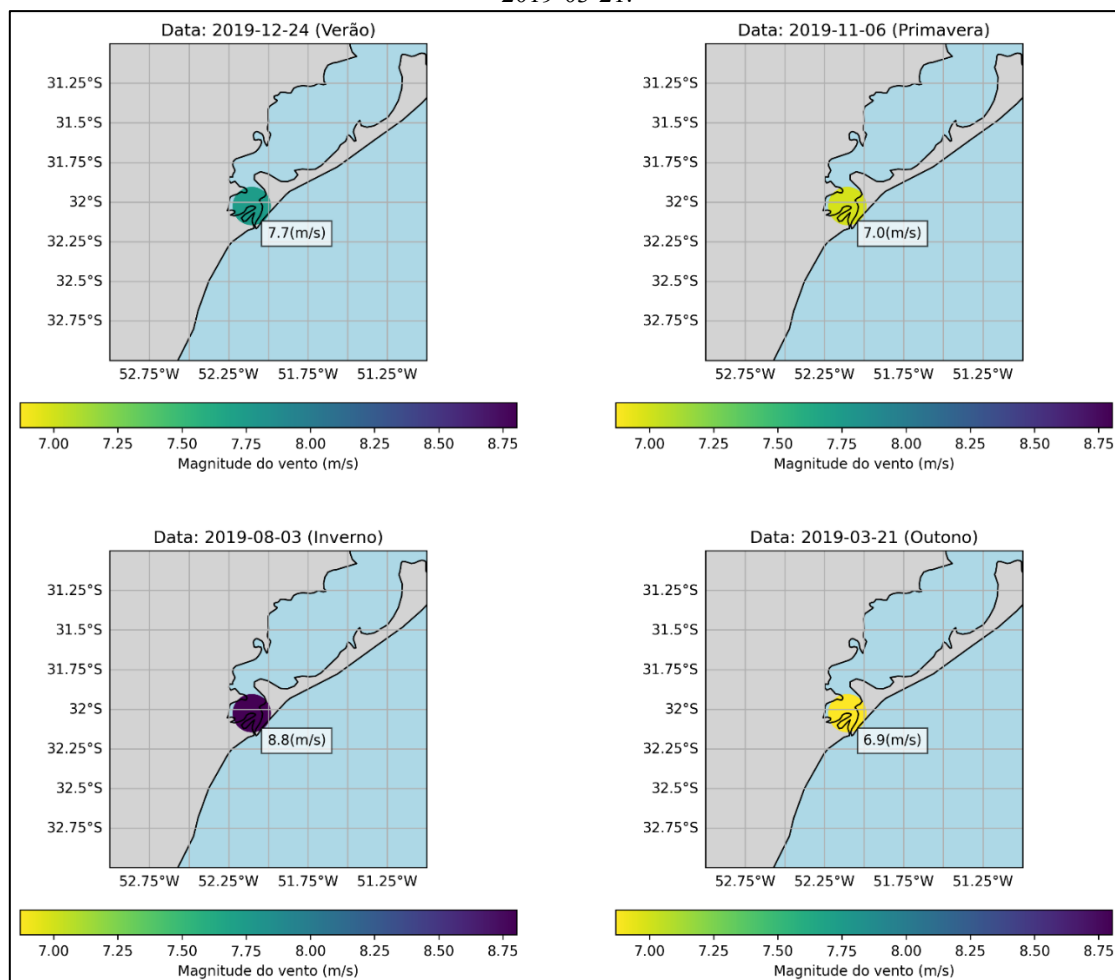
Figura 4. Valor pontual da pressão atmosférica para as datas correspondentes: 2019-12-24, 2019-11-06, 2019-08-03 e 2019-03-21.



Fonte: Dados obtidos pela NOAA- NCEP/ DOE Reanalysis II.

O regime de ventos demonstrou uma tendência de intensificação progressiva ao longo do ano, variando de 5,31 m/s no verão para 7,60 m/s no inverno (Tabela 3), quando observamos os valores pontuais (Figura 5) percebe-se que o inverno apresentou a maior magnitude do vento, entretanto, o verão apresentou também um valor alto para o dia analisado. O comportamento encontrado para a média por estação, onde apresenta ventos mais intensos no inverno e mais amenos no verão, está de acordo com a literatura, que aponta o inverno como o período de maior passagem de frentes frias na região sul do Brasil, resultando em ventos mais fortes e persistentes (TÁVORA et al., 2019).

Figura 5. Valor pontual da magnitude do vento para as datas correspondentes: 2019-12-24, 2019-11-06, 2019-08-03 e 2019-03-21.



Fonte: Dados obtidos pela NOAA- NCEP/ DOE Reanalysis II.

Tabela 3. Médias e desvios padrões para a magnitude do vento e precipitação por estação do ano, para o período de 2018-2019.

Estação	Magnitude do Vento (m/s)		Precipitação (mm)		
	Média	Desvio Padrão	Média (mm/dia)	Desvio padrão	Total (mm)
Verão	5,31	2,59	0,62	2,67	219,40
Outono	7,01	2,89	2,44	7,92	909,33
Inverno	7,60	3,67	1,29	4,85	485,75
Primavera	7,11	3,14	1,27	5,22	456,48

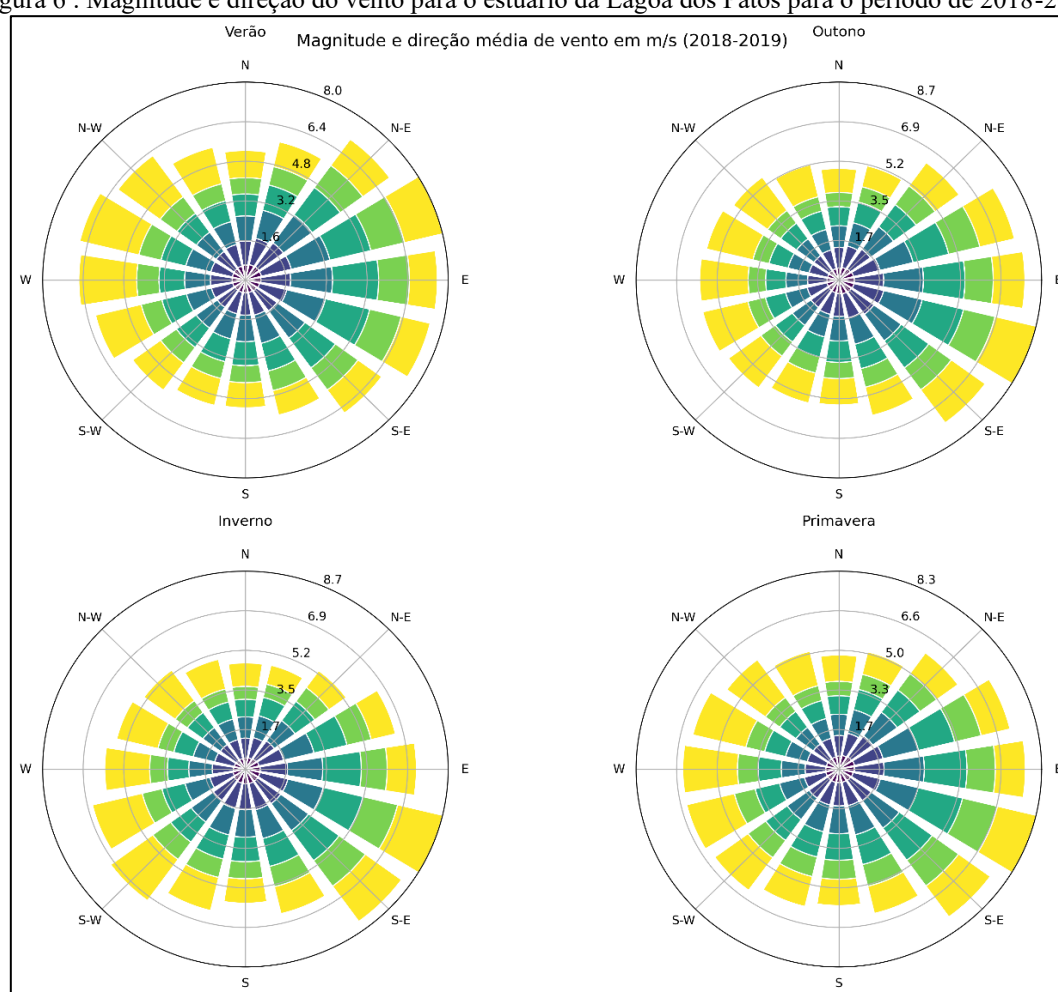
Fonte: Dados obtidos pela NOAA- NCEP/ DOE Reanalysis II.

Em critérios de magnitude e direção do vento por estação do ano, evidencia-se que a direção e a intensidade média dos ventos apresentam variação sazonal, com predominância dos quadrantes leste (E), sudeste (SE), Nordeste (NE), e Noroeste (NO) conforme a Figura 6. Essa distribuição está associada à influência da circulação atmosférica regional e às interações entre sistemas frontais e brisas marítimas, característicos da região costeira sul do Brasil.

No inverno, as velocidades máximas da intensidade do vento alcançam valores próximos de 8,7 m/s (excluindo rajadas), sendo registradas contribuições significativas dos quadrantes E, SE e sudoeste

(SW). Essa distribuição evidencia o impacto das frentes frias, que aumentam a variabilidade direcional e intensificam os fluxos provenientes de S e SW, esses resultados coincidem com a literatura (MÖLLER & FERNANDES, 2010). A análise sazonal dos ventos é essencial para a compreensão da hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos, uma vez que a direção e a intensidade dos fluxos eólicos condicionam processos de mistura e estratificação da coluna d'água, transporte de sedimentos e nutrientes, bem como a renovação das águas no estuário, implicando também nos regimes de enchente e vazante do estuário.

Figura 6 . Magnitude e direção do vento para o estuário da Lagoa dos Patos para o período de 2018-2019.



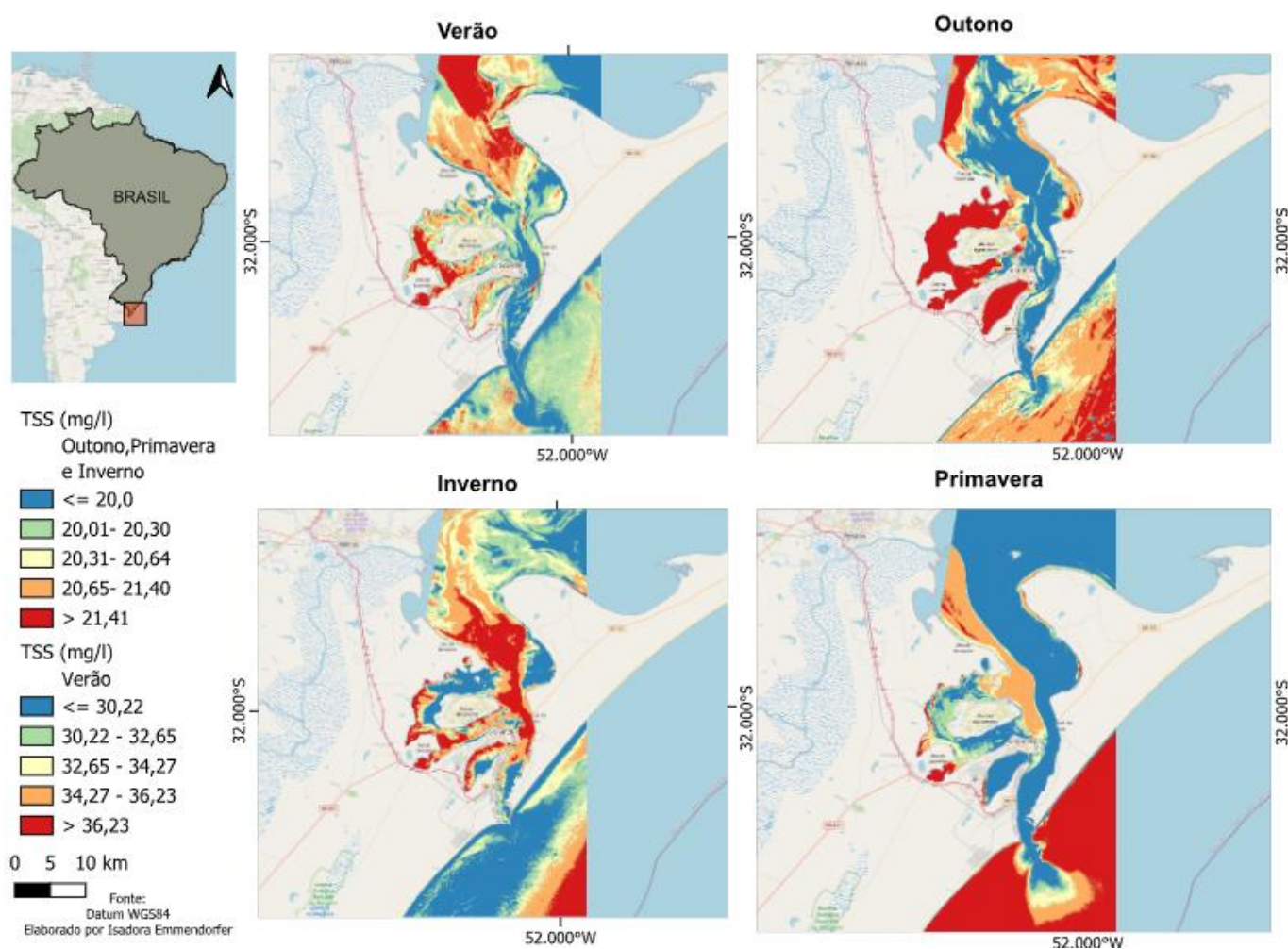
Fonte: Dados obtidos pela NOAA- NCEP/ DOE Reanalysis II.

A precipitação, por sua vez, apresentou forte concentração no outono, quando foram registrados 909 mm, valor aproximadamente quatro vezes superior ao observado no verão (219 mm). Essa anomalia pluviométrica é típica de anos de El Niño, nos quais há intensificação de chuvas no sul do Brasil e aumento das descargas fluviais (ANDRADE et al., 2023). Esse aporte hídrico adicional tem

implicações diretas na hidrodinâmica da Lagoa dos Patos, aumentando a descarga de água doce e favorecendo a ressuspensão de sedimentos finos, posteriormente transportados para o corpo lagunar.

Os resultados obtidos a partir do processamento das imagens dos sensores MSI da série dos satélites SENTINEL-2 (A e B) demonstraram concentração máxima de TSS durante o verão, com valores ≥ 36 mg/L (Figura 7). Esse pico, entretanto, está diretamente relacionado à elevada precipitação ocorrida no outono anterior, que promoveu o aporte de sedimentos e nutrientes para o sistema. A ação dos ventos sazonais intensificou a ressuspensão, redistribuindo os sólidos suspensos ao longo da coluna d'água. Esse efeito de precipitação intensa seguida por ressuspensão e manutenção de altas concentrações de TSS já havia sido identificado em outros estudos em lagunas e estuários tropicais e subtropicais (MARQUES et al., 2009)

Figura 7. Distribuição de sólidos totais em suspensão para as data correspondentes: 2019-12-24, 2019-11-06, 2019-08-03 e 2019-03-21.



Além disso, a intrusão de massas de ar frio no inverno contribuiu para a intensificação da mistura vertical e da circulação estuarina, influenciando a dispersão dos sólidos suspensos. Esse processo tem relevância ecológica, pois altera a disponibilidade de luz na coluna d'água, afetando a produtividade primária e a distribuição de espécies fitoplanctônicas (FERNANDES et al., 2005).

Neste sentido, a integração dos dados atmosféricos com as estimativas de TSS evidencia que a qualidade da água no estuário da Lagoa dos Patos é altamente sensível a forçantes climáticas de escala regional e global. Em particular, a ocorrência do El Niño de 2018–2019 alterou significativamente a sazonalidade local, resultando em:

- Outono mais quente que o verão, refletindo anomalias térmicas típicas desse fenômeno;
- Episódios de precipitação extrema, responsáveis por maior aporte de sedimentos e nutrientes;
- Ventos mais fortes no inverno, favorecendo processos de ressuspensão;
- Concentrações mais elevadas de TSS no verão subsequente, indicativas de transporte acumulado de sedimentos.

Em comparativo com a literatura, resultados semelhantes foram observados como o exemplo do trabalho de FERNANDES ET AL. (2002), onde documentaram, durante o episódio de 1998, aumento da intrusão de água doce e alterações na salinidade, que impactaram diretamente a distribuição de espécies estuarinas, quando o estuário da Lagoa dos Patos estava sobre influência de eventos de El Niño. De forma análoga, TÁVORA et al. (2019) destacaram que ventos persistentes e de maior intensidade durante anos de El Niño podem modificar o transporte de sedimentos, ampliando a turbidez da água.

Do ponto de vista de qualidade ambiental, a manutenção de concentrações elevadas de TSS pode ter efeitos negativos na biota aquática, reduzindo a penetração de luz e comprometendo processos fotossintéticos. Além disso, sólidos suspensos podem atuar como vetores de contaminantes químicos e biológicos, ampliando os riscos de eutrofização e poluição microbiológica (BAUMGARTEN & PAIXÃO, 2013; BAUMGARTEN & POZZA, 2021).

Os resultados apresentados aqui reforçam que estuários de grande porte, como o estuário da Lagoa dos Patos, são ambientes altamente vulneráveis a mudanças climáticas e necessitam de abordagens inovadoras de monitoramento. A utilização de dados de sensores a bordo de satélites e técnicas de geoprocessamento constitui uma estratégia promissora para superar limitações de métodos tradicionais, garantindo maior cobertura espacial e temporal das análises.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a dinâmica do Total de Sólidos em Suspensão (TSS) no estuário da Lagoa dos Patos é fortemente modulada por variabilidades climáticas de grande escala, em particular pela ocorrência de fenômenos como El Niño e Lã Niña. A análise referente ao período de 2019 mostrou padrões sazonais atípicos, como a elevação da temperatura média do ar no outono em relação ao verão, a intensificação dos ventos durante o inverno sob condições de alta pressão e a precipitação extrema registrada na estação do outono. Esses fatores, combinados, desencadearam alterações significativas na hidrodinâmica do estuário, resultando em concentrações elevadas de TSS no verão subsequente.

A integração de dados de sensoriamento remoto em conjunto com dados de reanálise, demonstrou que picos de sólidos suspensos não estão necessariamente associados a um único evento climático, mas decorrem da interação entre múltiplos forçantes, incluindo precipitação, ventos e descargas fluviais. Além disso, confirma o potencial do uso de imagens dos sensores MSI da série de satélites Sentinel-2 (A e B), aliado a técnicas de geoprocessamento, como ferramenta robusta para o monitoramento ambiental em larga escala.

Além disso, este trabalho contribui ao demonstrar que o estuário da Lagoa dos Patos responde de maneira sensível a eventos climáticos de intensidade moderada, como o El Niño de 2018–2019. Grande parte da literatura sobre a região já enfatizou que episódios de maior magnitude, como o El Niño de 1998 influenciaram a região; contudo, nossos resultados sugerem que mesmo fenômenos de menor intensidade podem gerar anomalias ambientais relevantes, alterando padrões de circulação, transporte de sedimentos e qualidade da água. Neste sentido, o trabalho amplia a compreensão sobre a vulnerabilidade do sistema e destaca a importância de considerar a variabilidade interanual em estratégias de gestão costeira e em iniciativas que visem modelar e simular computacionalmente essa dinâmica.

Entretanto, cabe também destacar as limitações deste estudo onde, embora as imagens dos sensores MSI dos satélites SENTINEL-2 (A e B) ofereçam resolução espacial adequada, a análise empregada restringiu-se a utilizar apenas quatro cenas representativas uma para cada estação do ano, o que reduz a capacidade de capturar eventos extremos de curta duração. Além disso, as equações empíricas utilizadas para estimar os valores de TSS, ainda que validadas em ambientes brasileiros, podem não refletir plenamente a diversidade espectral do estuário da Lagoa dos Patos. Neste sentido, estudos futuros devem priorizar a calibração local dessas equações, por meio de saídas de campo que integrem medições *in situ* e em comparativo à dados espectrais de sensores de satélites. Recomenda-se também para pesquisas futuras, ampliar a série temporal de análise, incorporando diferentes eventos

de El Niño e La Niña, a fim de comparar suas magnitudes e efeitos sobre o sistema. Outra possibilidade é a integração com modelos numéricos e modelos dinâmicos, que possibilitam simular diferentes cenários de eventos meteorológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Código de Financiamento 001), à Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. Também agradecem aos colegas de laboratório do AstroESUL.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F. M. de; GODOI, V. A.; ARAVÉQUIA, J. A. Why above-average rainfall occurred in Northern Northeast Brazil during the 2019 El Niño? *Meteorology*, v. 2, n. 3, p. 307–328, 2023.
- BAUMGARTEN, M. G. Z.; PAIXÃO, B. G. Uso do índice do estado trófico para avaliar a qualidade das águas do estuário da Lagoa dos Patos (RS). *Atlântica (Rio Grande)*, v. 35, n. 1, p. 5–22, 2013.
- BAUMGARTEN, M. G. Z.; POZZA, S. A. Qualidade de águas: descrição de parâmetros referidos na Legislação Ambiental [recurso eletrônico]. 2. ed. Rio Grande, RS: Ed. da FURG, 2021. 242 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 53, p. 58–63, mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450.
- CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAUD, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y.-G.; SANTOSO, A.; et al. Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020.
- FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R.; MOLLER, O.; NIENCHESKI, L. F. H. The Patos lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, v. 22, n. 11–13, p. 1699–1713, 2002.
- FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R.; MOLLER, O. O. Spatial gradients in the flow of southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research*, v. 21, n. 4, p. 759–769, 2005.
- FERNANDES, E. H. L.; MONTEIRO, I. O.; MOLLER JR., O. O. On the dynamics of Mangueira Bay—Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research*, n. 10047, p. 97–107, 2010.
- GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, [S.l.], v. 16, n. 8, p. 1298, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s16081298>
- MARQUES, W.; FERNANDES, E.; MONTEIRO, I.; MÖLLER, O. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*, v. 29, n. 3, p. 556–571, 2009.
- MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A. et al. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, v. 2, n. 1, p. 2391, 2021.
- MÖLLER, Osmar; FERNANDES, Elisa. Hidrologia e hidrodinâmica. In: SEELIGER, Ulrich; ODEBRECHT, Clarisse (Eds.). *O Estuário da Lagoa dos Patos: Um Século de Transformações*. Rio Grande: FURG, 2010. p. 17–2
- PAHLEVAN, N. et al. Sentinel-2/Landsat-8 product consistency and implications for monitoring aquatic systems. *Remote Sensing of Environment*, [S.l.], v. 220, p. 19–29, 2019.

PEIXOTO, D. W. B.; GUASSELLI, L. A.; PEREIRA FILHO, W. Estimativa de concentração e sedimentos em suspensão a partir de imagens LANDSAT 8 em PCHS no rio Ivaí-RS. *Geosciences = Geociências*, v. 37, n. 1, p. 147–154, 2018.

TAVORA, J.; FERNANDES, E. H.; THOMAS, A. C.; WEATHERBEE, R.; SCHETTINI, C. A. The influence of river discharge and wind on Patos Lagoon, Brazil, Suspended Particulate Matter. *International Journal of Remote Sensing*, v. 40, n. 12, p. 4506–4525, 2019.