

EFEITOS DA DIREÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO NOS DESNÍVEIS DA LAGOA MIRIM

LUCIANA SHIGIHARA LIMA¹; ELISA HELENA FERNANDES²; ALEXANDRE FELIPE BRUCH³; GILBERTO LOGUERCIO COLLARES⁴

¹*Universidade Federal de Pelotas – lushilima@gmail.com*

²*Universidade Federal de Rio Grande – fernandes.elisa@gmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – afbruch@gmail.com*

⁴*Universidade Federal de Pelotas – gilbertocollares@gmail.com*

1. INTRODUÇÃO

A adaptação dos cursos d'água para navegação através de intervenções como a dragagem pode alterar as características dos leitos fluviais, afetar o transporte de sedimentos e comprometer a conectividade ecológica dos rios com suas planícies de inundação (Banasiaik, 2024). Essas mudanças podem resultar na perda de habitats naturais e na necessidade de constantes intervenções, como a dragagem, para manter a profundidade necessária para a navegação. Neste contexto, um dos aspectos fundamentais para garantir o desenvolvimento sustentável em cursos de água, é a análise da sua hidrodinâmica em diferentes cenários.

A utilização de métodos de modelagem estatística desempenha um papel central neste processo, pois permite identificar e quantificar relações entre variáveis hidrodinâmicas e forçantes ambientais, fornecendo uma base empírica robusta para a compreensão da dinâmica do sistema. Esses resultados estatísticos constituem um embasamento essencial para a modelagem numérica, uma vez que orientam a escolha de parâmetros e validam os processos representados nos modelos. Assim, a integração entre modelagem estatística e numérica possibilita simular cenários de intervenção de forma mais realista, prever alterações na hidrodinâmica e na dinâmica sedimentar das hidrovias e identificar os fatores que influenciam sua morfodinâmica. Os modelos hidrodinâmicos e morfodinâmicos, por sua vez, permitem explorar cenários de transporte de sedimentos, mapear áreas de assoreamento e avaliar a eficácia de estratégias de mitigação, como dragagem e obras hidráulicas (Bui et al., 2019). Além disso, quando apoiados em evidências estatísticas, podem investigar cenários extremos com maior confiabilidade, considerando variáveis climáticas, vazões fluviais e impactos de infraestrutura, contribuindo para o planejamento sustentável e resiliente das hidrovias (Brooks et al., 2020).

A Lagoa Mirim e seu complexo de áreas úmidas formam uma das principais bacias transfronteiriças da América do Sul, apresentando grande importância econômica e ecológica para o Rio Grande do Sul e o Uruguai. Desde a década de 1970, diversos estudos analisaram sua hidrologia, qualidade da água e circulação hidrodinâmica, destacando a influência do regime de chuvas, dos ciclos de El Niño-Oscilação Sul e das trocas hídricas com a Lagoa dos Patos (Hirata et al., 2010 e Oliveira et al., 2015; 2019). No entanto, com a eminente implementação da Hidrovia Uruguai-Brasil, é fundamental considerar o estudo da dinâmica hidrológica, hidrodinâmica e morfodinâmica, como ferramenta para a gestão sustentável dos recursos hídricos, o desenvolvimento da navegação e a consolidação do uso de suas águas para irrigação. Este estudo tem como objetivo avaliar as relações diretas e indiretas entre a forçante do vento (velocidade e direção) e a variação do nível d'água

na Lagoa Mirim através de modelagem estatística, contribuindo para o planejamento, implementação e posterior manutenção da hidrovia Uruguai-Brasil.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada foi a Modelagem por Equações Estruturais (SEM), uma técnica estatística multivariada que permite testar um conjunto de hipóteses de causa e efeito de forma simultânea. Para a análise, foram utilizadas as séries históricas de nível d'água de duas estações limnimétricas, a estação de monitoramento de Santa Izabel (SI) localizada na porção norte e a estação de Santa Vitória do Palmar (SVP) na porção sul (Figura 1), que foram integradas com dados atmosféricos de velocidade e direção do vento obtidos a partir do conjunto de dados de reanálise ERA5 (ECMWF). O pré-processamento inicial consistiu na harmonização temporal das séries e na remoção de registros com dados ausentes para garantir a consistência da análise. O período utilizado para ambas variáveis (vento e nível), foi de dados diários de 1977 a 2016.

Um tratamento metodológico central foi aplicado à variável de direção do vento para possibilitar uma interpretação física clara dos resultados. A direção, originalmente em formato angular (graus), foi convertida para um conjunto de variáveis categóricas que representam as oito direções cardeais e intercardeais. Subsequentemente, essas categorias foram transformadas em variáveis *dummy* (indicadoras) para inclusão no modelo estatístico. De forma estratégica, a direção 'Norte' foi estabelecida como a categoria de referência, permitindo que os coeficientes de todas as outras direções fossem interpretadas como o efeito diferencial em comparação direta com o vento de quadrante Norte.

A modelagem estatística foi conduzida em ambiente Python, utilizando a biblioteca *semopy*. Inicialmente, foi postulado um modelo teórico completo, hipotetizando que tanto a velocidade quanto as direções do vento influenciavam diretamente os níveis d'água em ambas as estações, incluindo também as correlações entre todas as variáveis independentes e entre as duas séries de nível. Após o ajuste do modelo aos dados, foram avaliados os coeficientes de caminho, que quantificam a força e a direção de cada relação, e sua respectiva significância estatística (*p*-valor). Como etapa final, os resultados foram filtrados para reter apenas os caminhos estatisticamente significativos ($p \leq 0.05$), resultando em um modelo final, que destaca apenas as interações mais relevantes e facilita a compreensão dos mecanismos hidrodinâmicos dominantes no sistema lagunar.

A aplicação desta metodologia integrada permitiu não apenas identificar os principais vetores de forçantes e suas relações, mas também quantificar a magnitude de seus efeitos. Isso viabilizou uma maior compreensão da resposta sistêmica do complexo lagunar, revelando dinâmicas importantes como o característico efeito de "gangorra" que ocorre entre seus extremos sob a influência de diferentes regimes de vento.

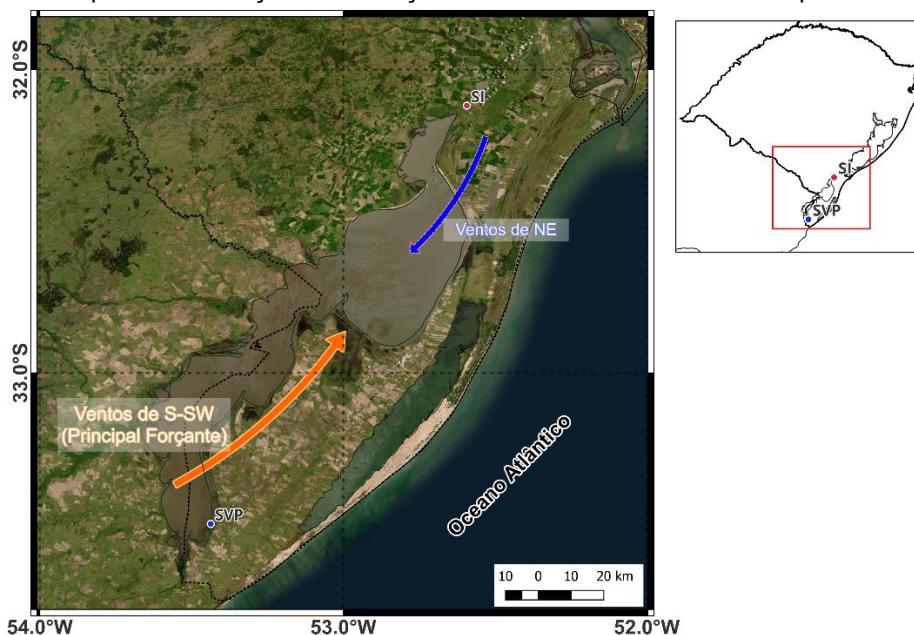
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição geográfica das estações limnimétricas nos extremos norte e sul da Lagoa Mirim possibilita a análise dos desniveis entre as extremidades da lagoa. Os resultados da modelagem estatística indicam que a direção do vento é o fator predominante na modulação dos níveis em escalas de tempo curtas, induzindo um pronunciado efeito de "gangorra" ao longo do eixo longitudinal da lagoa.

A análise dos efeitos sobre a estação de Santa Izabel (SI) demonstrou uma forte suscetibilidade ao represamento de água por ventos provenientes do quadrante

sul. Especificamente, ventos de Sudoeste (+0.270; $p < 0.001$) e Sul (+0.264; $p < 0.001$) apresentaram os maiores coeficientes de efeito positivo, indicando uma elevação significativa do nível. Em contraste direto, a estação de Santa Vitória do Palmar (SVP) exibiu resposta oposta, na qual os ventos de Sudoeste (-0.159; $p < 0.001$) tenderam a reduzir o nível, de forma estatisticamente significativa. Outras direções apresentaram efeitos pouco expressivos ou não significativos (Figura 1).

Figura 1: Mapa de localização das estações de monitoramento e ventos predominantes.



Fonte: Autora

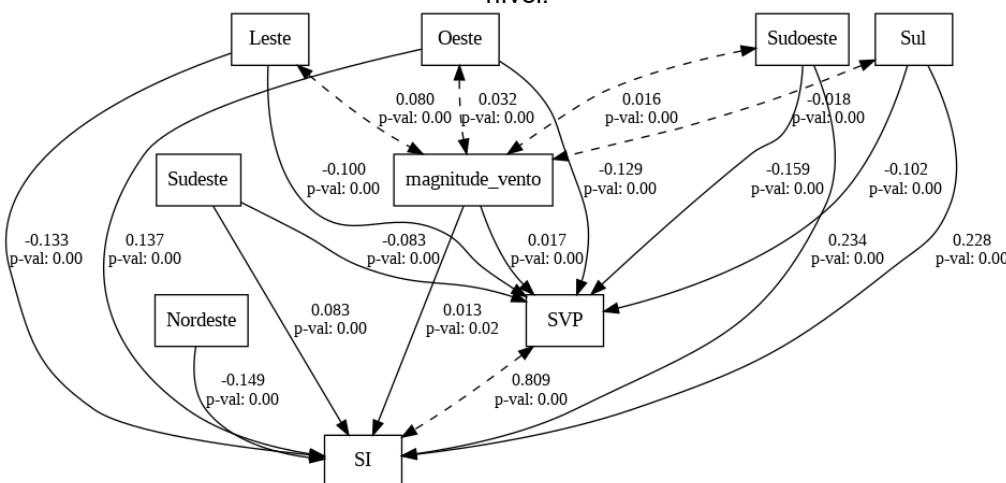
Esta dinâmica de “gangorra” é um fenômeno bem documentado na literatura científica sobre a Lagoa Mirim. Oliveira et al. (2019) destacaram que ventos do quadrante S-SW empurram a água para o norte, e Oliveira et al. (2015) também observaram que ventos do quadrante sul empilham água no setor norte desta lagoa. Mais recentemente, Bendô et al. (2023) reafirmaram que o *wind setup* (empilhamento pelo vento) desempenha um papel significativo no estabelecimento de gradientes de elevação entre o norte e o sul.

Diversos autores concordam que a circulação da lagoa é primariamente governada pela descarga fluvial em escalas de tempo sazonais e anuais, sendo modulada pelo vento em períodos mais curtos. Bendô et al. (2023), citando estudos anteriores, especificam que os padrões de circulação associados ao vento ocorrem em escalas de 2 a 16 dias. Nossos resultados, portanto, quantificam com alta resolução a resposta hidrodinâmica de curto prazo ao vento, que se sobrepõe à variabilidade de longo prazo ditada pelo balanço hídrico da bacia. A alta correlação positiva encontrada entre os níveis das duas estações ($r = 0.809$; $p < 0.001$) reflete essa resposta conjunta do sistema a eventos hidrológicos de maior escala.

Os resultados de Bendô et al. (2023) sobre o transporte de sedimentos oferecem uma validação indireta adicional aos nossos achados. O estudo concluiu que a via principal de transporte de sedimentos ocorre na direção sudoeste – nordeste, seguindo o fluxo residual da água. Essa direção predominante do transporte de material é consistente com a dominância dos ventos de Sudoeste e Sul, identificada em nosso modelo como as forçantes mais influentes para a geração dos desníveis.

Em síntese, a aplicação da metodologia SEM quantificou as relações de causa e efeito em escala sinótica, validando e sendo validada por resultados de modelos hidrodinâmicos e morfodinâmicas anteriores (Figura 2). A convergência dos resultados entre diferentes metodologias fortalece a compreensão da dinâmica do sistema e demonstra o potencial da modelagem estatística SEM como ferramenta diagnóstica, capaz de embasar e complementar a simulação numérica de cenários ambientais.

Figura 2: Diagrama do Modelo de Equações Estruturantes (SEM) para a dinâmica de vento e nível.



Fonte: Autora

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou, através da modelagem estatística SEM, que os ventos de quadrante sul governam os desníveis na Lagoa Mirim. O efeito de "gangorra" foi quantificado, mostrando que ventos de Sul (+0.264) e Sudoeste (+0.270) elevam o nível na estação norte (Santa Izabel), enquanto o reduzem significativamente na estação sul (Santa Vitória do Palmar). A velocidade do vento apresentou um efeito positivo secundário. Conclui-se que o SEM é uma ferramenta valiosa para quantificar a resposta hidrodinâmica da Lagoa Mirim ao vento, oferecendo uma base robusta para a gestão de recursos hídricos e a calibração de modelos numéricos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENDÔ, A. R. R.; DA SILVA, D. V.; COSTI, J.; et al. Hydromorphodynamics modeling of dredging and dumping activities in Mirim lagoon, RS, Brazil. **Ocean Engineering**, v. 289, 2023. Elsevier Ltd.
- BROOKS, A.; ROBERTS, H.; BROOKE, J. Impacts of climate change on transport and infrastructure, relevant to the coastal and marine environment around the UK. **MCCIP Science Review**, p. 566–592, 2020.
- BUI, V. H.; BUI, M. D.; RUTSCHMANN, P. Advanced numerical modeling of sediment transport in gravel-bed rivers. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 3, 2019. MDPI AG.
- HIRATA, F. E.; MÖLLER JÚNIOR, O. O.; MATA, M. M. Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, southern Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 254–266, 2010.
- OLIVEIRA, H.; FERNANDES, E.; JUNIOR, O.; COLLARES, G. Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 34–45, 2015.
- OLIVEIRA, H.; FERNANDES, E.; MÖLLER, O.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, F. Relationships between wind effect, hydrodynamics and water level in the world's largest coastal lagoonal system. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 11, 2019.