

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE NO RIO GUARAGUAÇU – PR

Danilo de Oliveira Sant'Ana¹, Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha², Mauricio Almeida Noernberg³

Abstract: This study presented an analysis of the time series of water surface elevation in the Guaraguaçu River (Paraná, Brazil) using spectral analysis, aiming to identify the semidiurnal tidal components in order to understand their propagation and attenuation along the estuary. Measurements were conducted at two points along the Cambará River, a tributary of the Guaraguaçu, using high-precision pressure sensors with 10-minute recording intervals. Data preprocessing included linear trend removal and application of the Fast Fourier Transform (FFT), with power spectral density estimated using the Welch method. The semidiurnal band was removed through spectral masking, allowing the reconstruction of residual series free of this component. The results indicated strong attenuation of the semidiurnal tide upstream, attributed to the sinuous morphology and shallow bathymetry of the channel, whereas in the region closer to the river mouth, periodic oscillations associated with the tide were more dominant.

Resumo: Este estudo mostrou uma análise das séries temporais da elevação da superfície livre da água no rio Guaraguaçu (PR) usando análise espectral, com o objetivo de identificar as componentes semidiurnas de maré, visando compreender sua propagação e atenuação ao longo do estuário. Foram realizadas medições em dois pontos ao longo do rio Cambará, um afluente do Guaraguaçu, utilizando sensores de pressão de alta precisão com intervalos de registro de 10 minutos. O pré-processamento dos dados, remoção de tendência linear e aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT), com estimativa da densidade espectral de potência pelo método de Welch. A remoção da faixa semidiurna foi realizada mediante mascaramento espectral, permitindo a reconstrução de séries residuais livres dessa componente. Os resultados indicaram uma forte atenuação da maré semidiurna a montante, atribuída à morfologia sinuosa e à batimetria rasa do canal, enquanto na região mais próxima à foz observou-se maior domínio das oscilações periódicas associadas à maré.

Palavras-Chave – Maré semidiurna; Análise espectral; Estuário

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas costeiros e estuarinos desempenham um papel importante na manutenção da biodiversidade e na prestação de serviços ecossistêmicos, como a proteção contra erosão, a filtragem de poluentes e a oferta de recursos pesqueiros. A compreensão da dinâmica hidrológica desses ambientes é importante para a gestão sustentável, a mitigação dos impactos das mudanças climáticas e das atividades antrópicas.

1) Programa de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental (PPGEA), Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná, R. Evaristo F. Ferreira da Costa, 357-367 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 82590-300, danilooliveira@ufpr.br

2) Programa de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental (PPGEA), Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná, R. Evaristo F. Ferreira da Costa, 357-367 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 82590-300, cynara@ufpr.br

3) Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Campus Pontal do Paraná, Universidade Federal do Paraná, Avenida Beira-Mar, s/nº – Pontal do Sul – Pontal do Paraná/PR, 83.255-000, m.noernberg@ufpr.br

Muitas vezes, para compreender esses sistemas, é necessário o uso de modelos hidrodinâmicos e hidrológicos, que dependem de dados de medição de algumas variáveis ambientais para a calibração. Uma dessas variáveis é elevação da superfície livre da água, cuja medição permite avaliar a influência tanto da maré quanto da vazão, em regiões estuarinas

Contudo, a medição acurada da elevação da superfície livre da água em estuários é desafiadora devido à complexidade da interpretação e da capacidade de conseguir simular em modelos hidrodinâmicos as interações entre as forças fluviais e marítimas, além das variações sazonais e meteorológicas. Rios afluentes que deságuam em estuários, como o rio Guaraguaçu no Paraná, esses desafios são ampliados pela presença de canais sinuosos, batimetria variável e influência direta das marés.

A análise de séries temporais de elevação da superfície livre da água por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite decompor os sinais em suas componentes de frequência, facilitando a identificação de padrões periódicos, como os ciclos de maré semidiurna (~12 horas) e diurna (~24 horas) (Raimundo, 2021). Essa abordagem é particularmente útil para distinguir entre os efeitos das marés e outras influências, como descargas fluviais e eventos meteorológicos extremos.

Neste contexto, o presente estudo visa analisar às séries temporais da elevação da superfície livre da água coletadas em dois pontos distintos do rio Guaraguaçu usando a análise espectral, utilizando a FFT. O objetivo é identificar e isolar as componentes de maré e avaliar a influência da morfologia do canal na propagação das ondas de maré.

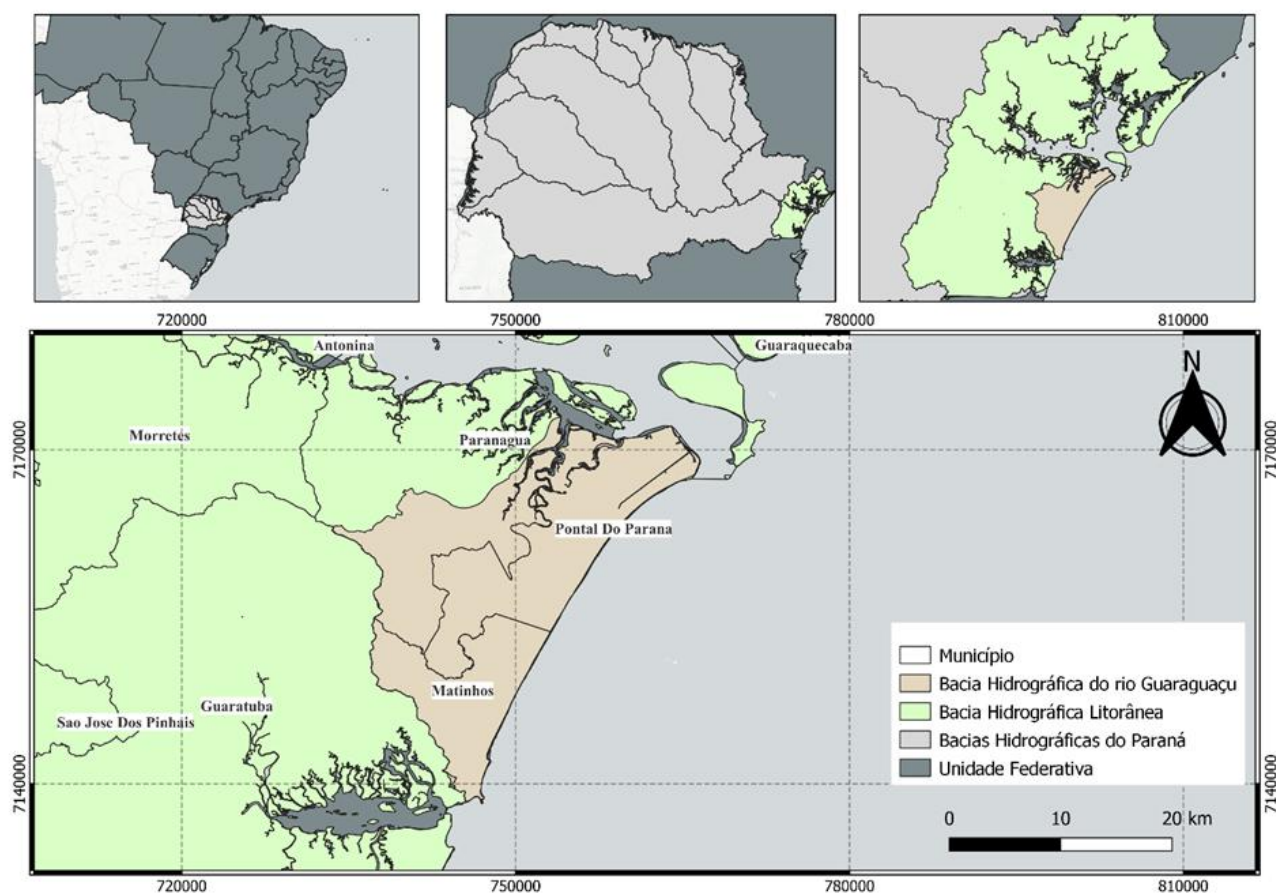


Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Guaraguaçu.
Fonte: Autores (2025)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. LOCAL DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu (Figura 1), localizada no litoral do estado do Paraná, é de grande importância para os municípios costeiros da região Sul do Brasil. Com área aproximada de 411 km², integra a Bacia Hidrográfica Litorânea, uma das dezesseis bacias hidrográficas do estado, conforme definido pela Resolução nº 024/2006/SEMA (SEMA, 2006).

O rio Guaraguaçu percorre os municípios de Matinhos, Paranaguá e Pontal do Paraná, desempenhando papel essencial no abastecimento público das cidades de Matinhos e Pontal do Paraná. Além disso, em sua área de influência, encontram-se três importantes unidades de conservação: o Parque Nacional de Saint-Hilaire/Lange, a Área de Proteção Ambiental de Guaratuba e a Estação Ecológica do Guaraguaçu, além de duas terras indígenas, Sambaqui e Ilha da Cotinga (Ladeira, 2008).

A bacia do rio Guaraguaçu abriga diferentes paisagens de formação pioneira de influência fluvial, como caixetais, brejos e várzeas (Bigarella, 2008; Ab'Saber, 2003), configurando um mosaico de ambientes característicos da zona costeira paranaense. Esses ambientes têm relevância ecológica para a conservação da biodiversidade e para a regulação dos recursos hídricos da região.

Do ponto de vista hidrodinâmico, o principal forçante na região próxima à embocadura do rio Guaraguaçu é a maré, cuja oscilação provoca a intrusão salina, caracterizada pelo avanço da água salgada do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) no interior do estuário e do rio (Sant'Ana, 2023).

2.2. LOCAL DE MEDIÇÃO E EQUIPAMENTO UTILIZADOS

A bacia do rio Guaraguaçu tem sua rede de drenagem composta por oito rios, sendo os principais os rios Guaraguaçu e Cambará (Figura 2) que apresentam as maiores áreas de drenagem na bacia.

As medições da elevação da superfície livre foram realizadas em dois locais no rio Cambará, indicados na Figura 2. O **Ponto 1** (latitude: -25.746612°; longitude: -48.554020°) na porção mais interna do rio Cambará, próximo a confluência com os rios Indaial e do Meio. O **Ponto 2** (latitude: -25.716520°; longitude: -48.537922°), por sua vez, encontra-se mais a jusante no curso do rio Cambará. A distância entre os pontos é de aproximadamente 7,4 km, sendo que o Ponto 2 está a mais de 33 km da foz do rio Guaraguaçu, afluente da Baía de Paranaguá.

Os períodos de medição foram distintos (por motivos de logística e disponibilidade do equipamento): no **Ponto 1**, as medições ocorreram de **27/03/2024 a 07/05/2024**, totalizando **41** dias; e no **Ponto 2**, de **21/11/2023 a 03/01/2024**, com duração de **43** dias. A região entre os pontos caracteriza-se por apresentar um canal estreito, raso e sinuoso. As medições foram realizadas utilizando o equipamento Levelogger 5 Junior que mede a pressão absoluta usando um sensor de pressão Hastelloy®, oferecendo alta resolução e precisão de 0,05%, com registros da elevação da superfície livre da água em intervalos regulares de 10 minutos.

2.3. PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

O processamento dos dados da elevação da superfície livre da água coletados foi realizado utilizando a linguagem de programação Python e as bibliotecas especializadas NumPy, SciPy, Matplotlib e Pandas. O procedimento analítico foi dividido em cinco etapas, descritas a seguir:

2.3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DA SÉRIE TEMPORAL

Inicialmente, realizou-se a leitura dos dados brutos provenientes dos equipamentos Levellogger 5 Junior. Os dados foram organizados em séries temporais contínuos, com intervalos regulares de 10 minutos. Foram verificados e removidos possíveis valores ausentes e outliers evidentes, garantindo a qualidade das séries antes da análise espectral.

2.3.2. REMOÇÃO DA TENDÊNCIA LINEAR

Como etapa preliminar à análise espectral, procedeu-se à remoção da tendência linear das séries, com o objetivo de tornar os dados estacionários em média para séries hidrológicas (Helsel et al. 2020). Essa remoção foi realizada por meio de regressão linear simples, subtraindo-se o valor estimado de tendência de cada ponto da série. A eliminação dessa tendência evita a concentração de energia nas baixas frequências, o que poderia mascarar picos significativos no espectro.

Não foi realizada formalmente um teste de estacionariedade; porém, a remoção de tendência linear pode ser considerada suficiente para que a série se comportasse aproximadamente estacionária durante a janela de análise

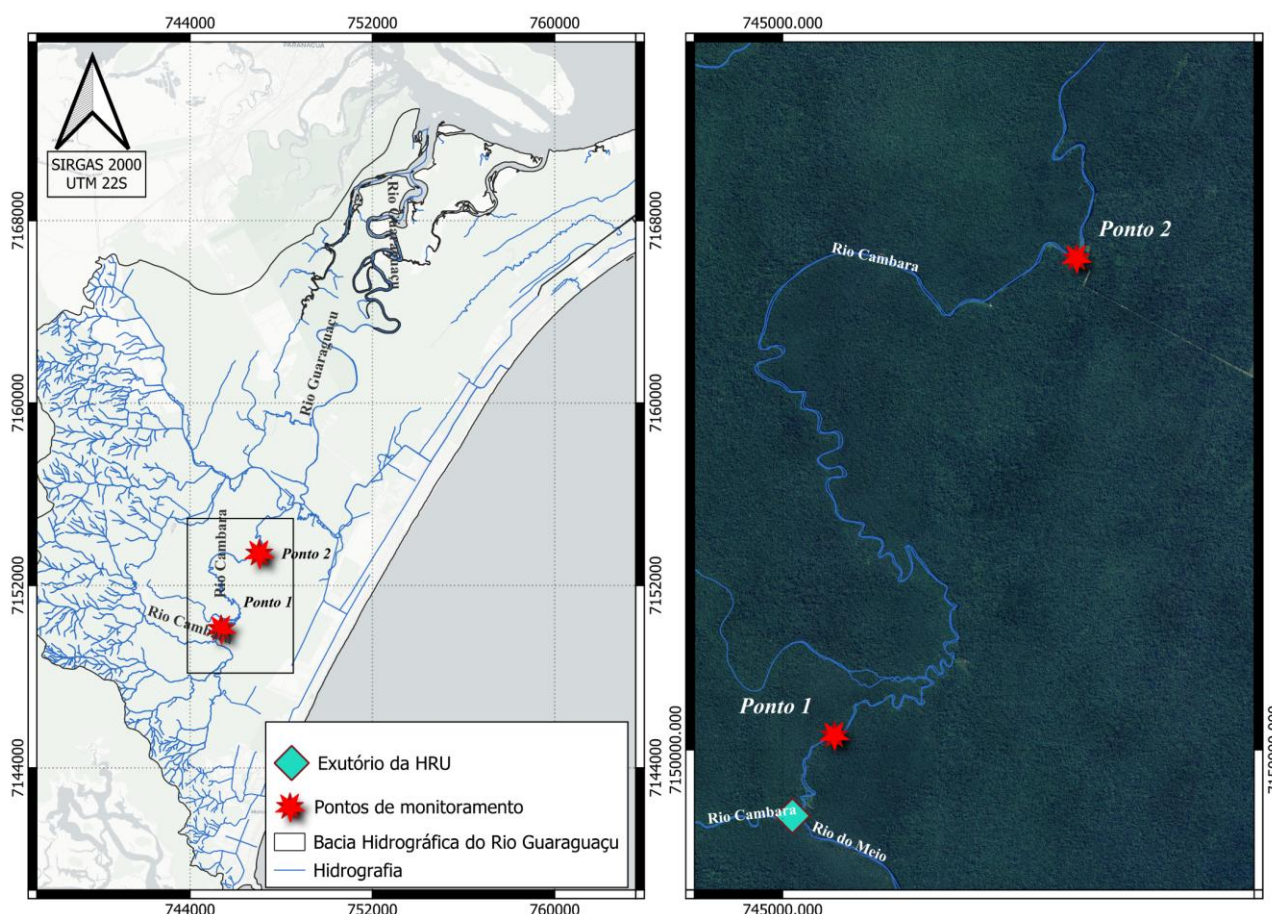


Figura 2 – Bacia Hidrográfica do Rio Guaraguaçu e a localização dos pontos de medição da elevação da superfície livre e do exutório da HRU do modelo hidrológico.

Fonte: Autores (2025)

2.3.3. ESTIMATIVA DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

Para identificar as frequências dominantes no comportamento da elevação da superfície livre da água, foi empregada a Transformada Discreta de Fourier (DFT), que permite converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência (Cooley et al. 1965)

Com o objetivo de estimar a densidade espectral de potência (DSP) e representar a distribuição da energia da série em função da frequência, utilizou-se o método de Welch (Welch, 1967). Esse método consiste na divisão da série temporal em segmentos sobrepostos, sobre os quais se aplicam janelas de ponderação que minimizam o vazamento espectral.

Na presente análise, foi adotada a janela de Hann, que reduz o vazamento espectral, além de uma sobreposição de 50% entre os segmentos, o que contribui para uma maior suavização da estimativa. Optou-se por janela de 2048 pontos (≈ 14 dias), pois equilibra boa resolução em baixas frequências (12 h e 24 h) e variabilidade estatística. A escolha do tamanho da janela foi realizada de forma a equilibrar a resolução espectral e a variabilidade estatística.

Essa abordagem permite identificar com maior clareza os picos de energia associados a componentes periódicas, como as marés semidiurna (~ 12 h) e diurna (~ 24 h), presentes nas baixas frequências do espectro.

2.3.4. ISOLAMENTO E REMOÇÃO DA COMPONENTE SEMIDIURNA

A identificação da componente de maré semidiurna foi feita a partir do espectro de potência, localizando o pico correspondente ao período de aproximadamente 12,42 horas, compatível com os constituintes astronômicos principais M_2 (12,42 h) e S_2 (12,00 h) (Rosman, 2025).

Após a remoção da tendência linear, a série foi transformada para o domínio da frequência por meio da Transformada de Fourier. Para isolar a componente semidiurna, aplicou-se uma máscara espectral que anulou os coeficientes correspondentes ao intervalo de 0,075 a 0,085 ciclos por hora, eliminando assim a influência direta das principais marés astronômicas. A transformada inversa reconstruiu o sinal residual, agora livre dessa componente de maré, mantendo as variações associadas a vazões fluviais, eventos pluviométricos e efeitos meteorológicos de maior período. Para reduzir eventuais artefatos provocados pelo corte abrupto no espectro, o sinal residual foi suavizado por meio de uma média móvel centrada de 36 pontos. O resultado final—uma série de nível sem a contribuição semidiurna—foi então utilizado nas análises posteriores.

3. RESULTADO

A Figura 3 apresenta a série temporal da elevação da superfície livre medida no **Ponto 1**, juntamente com a vazão estimada pelo modelo hidrológico desenvolvido por Sant'Ana (2023) para o rio Cambará, **a partir do ponto do exutório da Unidade Hidrológica de Resposta (HRU) referente ao rio Cambará** (Figura 2). Verifica-se que, ao longo do período amostral, a vazão constituiu o principal fator de influência nas variações da elevação da superfície livre, com predominância desse efeito entre os dias 09/04/2024 e 05/05/2024. Nos demais intervalos, observa-se a maior influência da maré sobre as oscilações da elevação da superfície livre da superfície livre, a exemplo do período compreendido entre 01/04/2024 e 09/04/2024.

Por sua vez, no **Ponto 2** (Figura 4), observa-se uma influência menos significativa da vazão sobre as variações da elevação da superfície livre. Ressalta-se que os períodos analisados nos dois pontos foram distintos, sendo que, no intervalo correspondente ao Ponto 2, foram registrados menores valores de vazão, o que pode ter contribuído para a redução dessa influência.

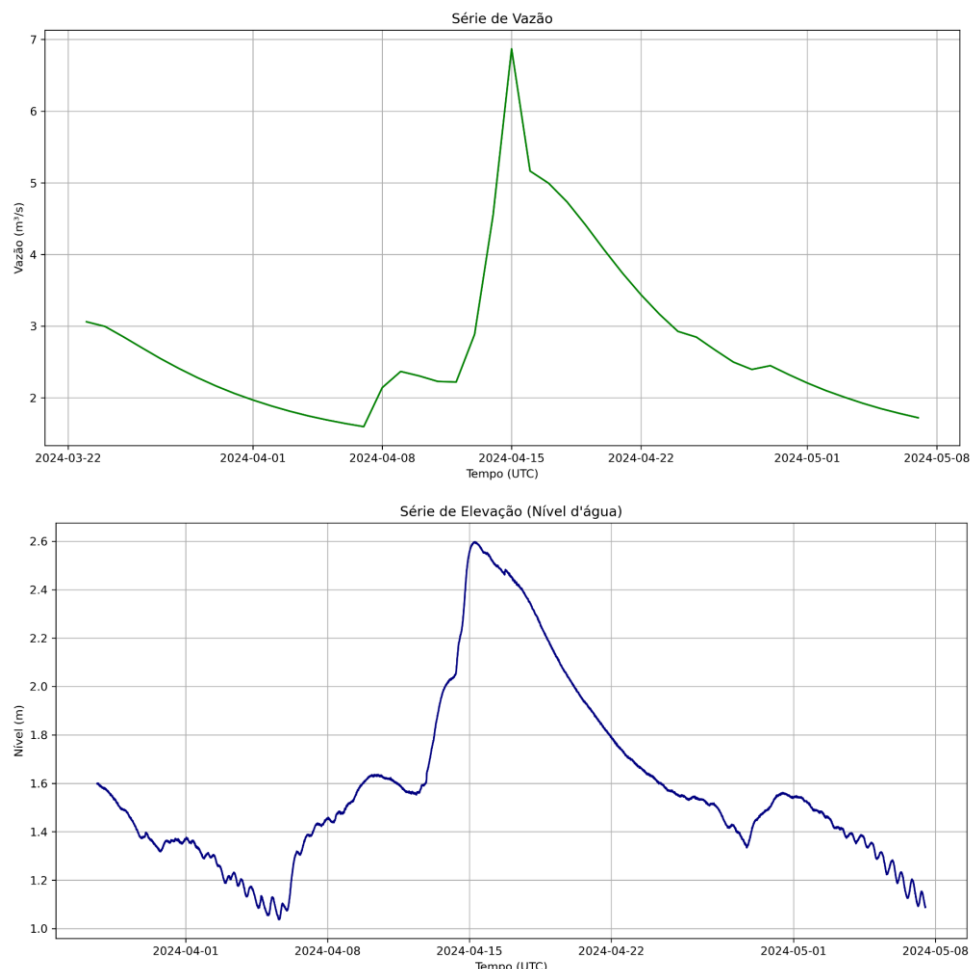


Figura 3 - Série de vazão do exutório da HRU modelo hidrológico desenvolvido por Sant' Ana (2023) (acima) e a medição de elevação da superfície livre (abaixo) no **Ponto 1**.
Fonte: Autores (2025)

A Figura 5 e Figura 6 exibem os espectros de potência estimados pelo método de Welch para os **Pontos 1 e 2**, respectivamente. Os valores de frequência, período e potência para os picos principais em cada ponto estão sumarizados na Tabela 1.

No **Ponto 1** (Tabela 1), o espectro é dominado por um pico de frequência muito baixa em 0,006 c/h ($\approx 170,67$ h; $\approx 7,11$ dias), com potência de 8 770,44 m²/(c/h), enquanto as componentes de maré aparecem apenas como resquícios: a semidiurna em 0,082 c/h ($\approx 12,19$ h; potência de 10,72 m²/(c/h)) e sua harmônica em 0,123 c/h ($\approx 8,13$ h; potência de 1,53 m²/(c/h)). Essa configuração indica que, a montante, a maré foi amplamente amortecida, restando apenas um sinal fraco nas bandas semidiurna e diurna, mas mantendo forte contribuição de ciclos de longa duração, possivelmente relacionados a variações hidrológicas ou meteorológicas de escala semanal.

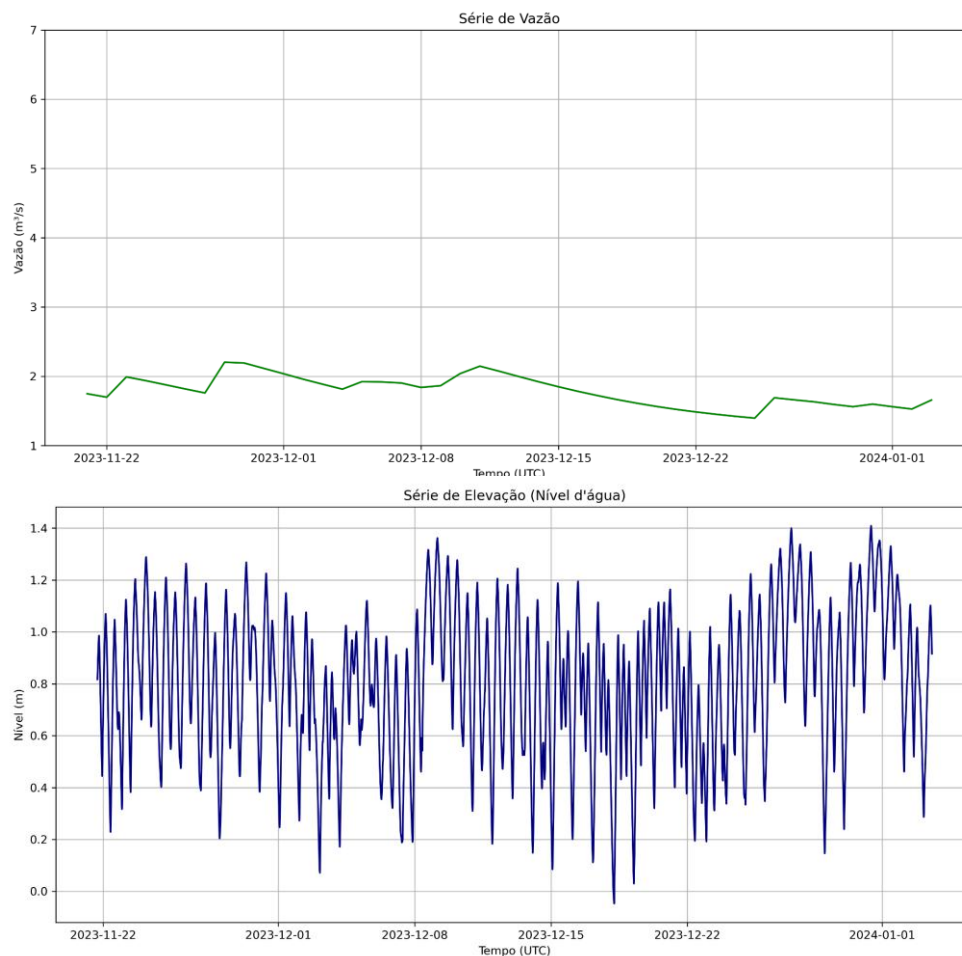


Figura 4- Série de vazão do exutório da HRU modelo hidrológico desenvolvido por Sant' Ana (2023) (acima) e a medição de elevação da superfície livre (abaixo) no **Ponto 2**.

Fonte: Autores (2025)

Já no **Ponto 2** (Tabela 1), o pico semidiurno de maré em 0,082 c/h ($\approx 12,19$ h) emerge como a componente mais pronunciada, com 20 138,50 $\text{m}^2/(\text{c/h})$, seguido pela frequência diurna em 0,041 c/h ($\approx 24,38$ h; 6 440,31 $\text{m}^2/(\text{c/h})$). Além disso, surgem evidências claras de oscilações de baixa frequência em 0,009 c/h ($\approx 113,78$ h; $\approx 4,74$ dias; 6 321,36 $\text{m}^2/(\text{c/h})$) e em 0,003 c/h ($\approx 341,33$ h; $\approx 14,22$ dias; 4 365,45 $\text{m}^2/(\text{c/h})$), bem como de uma harmônica secundária em 0,120 c/h ($\approx 8,33$ h; 2 562,80 $\text{m}^2/(\text{c/h})$). Esses resultados mostram que, a jusante, a maré semidiurna e diurna se combinam com respostas meteorológicas e hidrológicas de variadas escalas, produzindo um espectro mais rico e contrastante em comparação ao Ponto 1.

Tabela 1 - Frequências, períodos e potências dos picos espectrais em cada ponto

Ponto	Frequência (ciclos/hora)	Período (horas)	Período (dias)	Potencia ($\text{m}^2/(\text{c/h})$)
1	0.006	170.670	7.110	8770.440
	0.082	12.190	0.508	10.718
	0.123	8.127	0.339	1.525
2	0.082	12.190	0.508	20138.495
	0.041	24.381	1.016	6440.314
	0.009	113.778	4.741	6321.358
	0.003	341.333	14.222	4365.447
	0.120	8.325	0.347	2562.800

Fonte: Autores (2025).

Em resumo, embora não seja possível separar nitidamente os harmônicos M_2 ($\approx 12,42$ h) e S_2 ($\approx 12,00$ h) —pois ambos se fundem em um único pico centrado em $\approx 12,19$ h devido à resolução temporal e ao método de Welch—, a Tabela 1 deixa claro que a semidiurna (~ 12 h) domina em jusante (Ponto 2) e é consideravelmente amortecida a montante (Ponto 1). A presença do pico de 24 h em 0,041 c/h no Ponto 2 reforça a contribuição da maré diurna e possíveis ciclos meteorológicos de 1 dia.

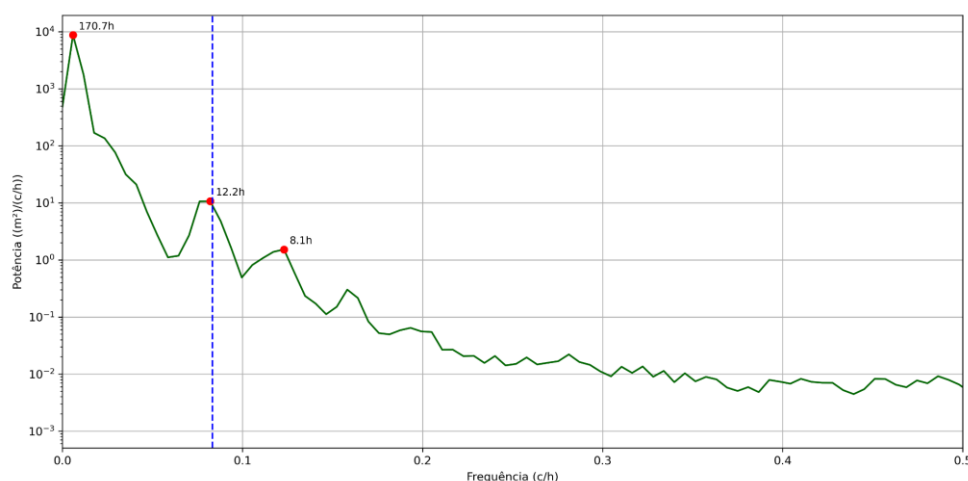


Figura 5 - Espectro de potência estimado pelo método de Welch para o **Ponto 1**.

Fonte: Autores (2025).

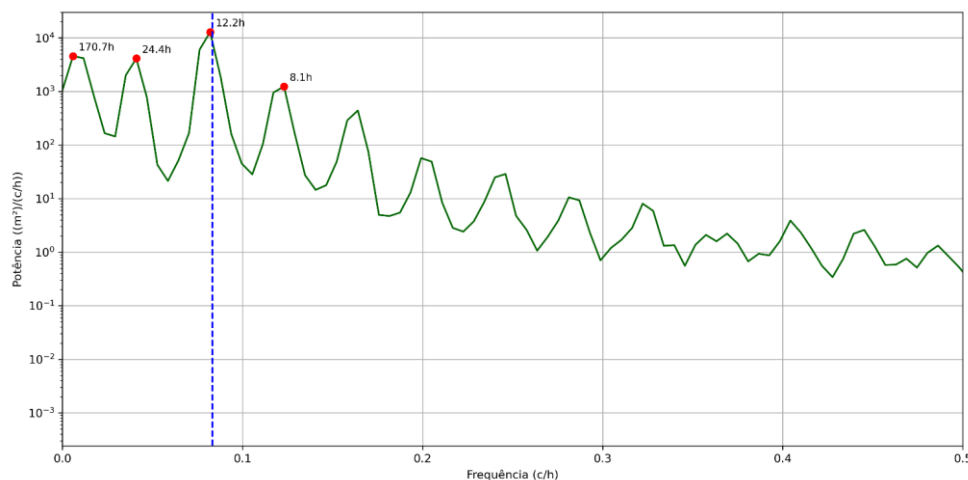


Figura 6 – Espectro de potência estimado pelo método de Welch para o **Ponto 2**.

Fonte: Autores (2025).

A Figura 7 apresenta as séries temporais bruta e processada para o **Ponto 1**, a qual foi removida a componente semidiurna da maré. Nesse ponto, as oscilações periódicas associadas à maré encontram-se mais atenuadas, em decorrência da dissipação e deformação da onda de maré provocadas pela sinuosidade e pela batimetria rasa do canal. O sinal residual, por sua vez, preserva oscilações de maior escala e caráter mais irregular, evidenciando a redução significativa da influência da maré nesse trecho do sistema.

Para o **Ponto 2**, a Figura 8 apresenta os resultados obtidos após a retirada da mesma componente semidiurna. Observa-se que, nesse ponto, situado mais próximo à foz, a série original

exibe oscilações bem definidas, com amplitude regular e comportamento marcadamente periódico, compatível com a ação das marés astronômicas. Após a remoção da componente semidiurna, o sinal residual revela variações de menor frequência e amplitude, atribuídas a fenômenos meteorológicos e ao aporte fluvial.

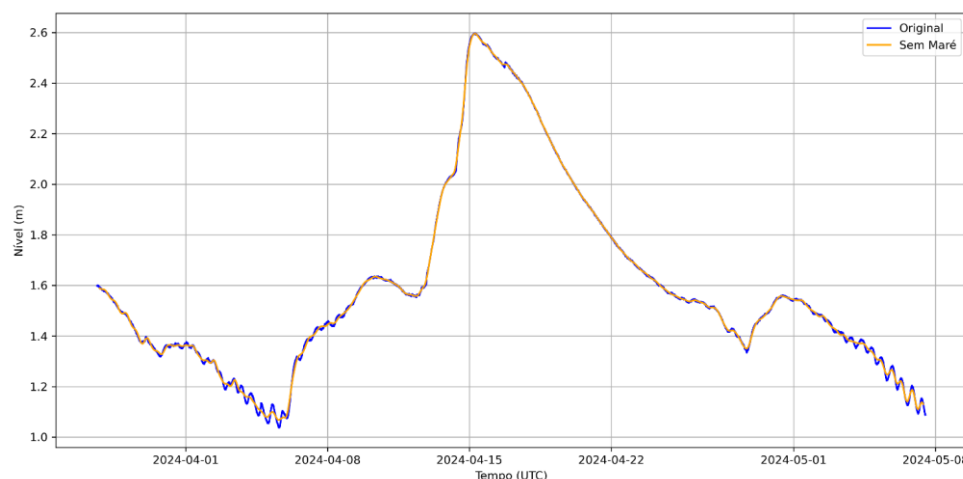


Figura 7 – Séries temporais da elevação da superfície livre bruta e processada, com remoção da maré semidiurna, no **Ponto 1**.

Fonte: Autores (2025)

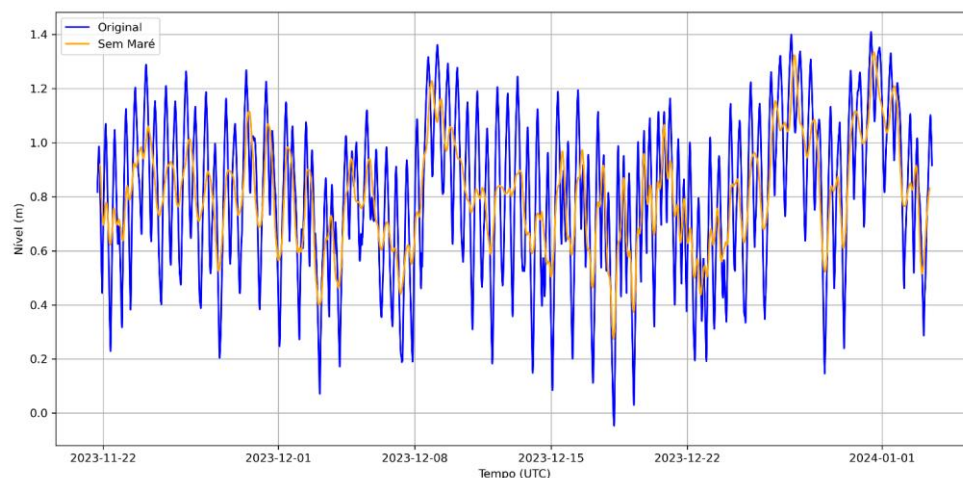


Figura 8– Séries temporais da elevação da superfície livre d'água bruta e processada, com remoção da maré semidiurna, no **Ponto 2**.

Fonte: Autores (2025)

4. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou, por meio de análise espectral utilizando a Transformada Rápida de Fourier e o método de Welch, a predominância da componente semidiurna (~12 h) na dinâmica da elevação da superfície livre d'água do rio Guaraguaçu, com maior intensidade observada na região próxima à foz. A atenuação progressiva dessa componente a montante está associada à morfologia sinuosa e à batimetria rasa do canal, reforçando o papel dessas características físicas como moduladoras da propagação da maré.

A abordagem metodológica empregada mostrou-se eficaz para isolar componentes periódicas em séries temporais hidrológicas, sendo especialmente útil em sistemas estuarinos com forte

influência de múltiplos forçantes. No entanto, é importante destacar como limitação a não coincidência temporal entre os conjuntos de dados dos dois pontos de medição, o que pode introduzir incertezas na comparação direta dos espectros.

Os resultados aqui apresentados podem subsidiar estudos mais abrangentes sobre a intrusão salina e auxiliar no refinamento de modelos hidrodinâmicos da região. Futuras pesquisas poderão integrar a análise espectral para os dados de salinidade e dados meteorológicos, possibilitando uma compreensão mais completa da variabilidade hidrodinâmica do sistema Guaraguaçu e sua resposta a eventos extremos as mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

5. REFERÊNCIAS

AB'SABER A. N. Os domínios de natureza no Brasil – Potencialidades paisagísticas. Ateliê Editorial. São Paulo. 2003.

BIGARELLA, J. J.; KLEIN, R.; LOYOLA E SILVA, J.A.; PASSOS, E. A Serra do Mar e a Planície Costeira do Paraná: Um problema de segurança ambiental e nacional. (Contribuições à geografia, geologia e ecologia regional). Florianópolis: UFSC, 2008. 391 p. (Série livros geográficos; 2) ISBN 978-85-60501-02-1

COOLEY, James W.; TUKEY, John W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, v. 19, n. 90, p. 297-301, 1965.

Helsel, D.R., Hirsch, R.M., Ryberg, K.R., Archfield, S.A., and Gilroy, E.J., 2020, Statistical methods in water resources: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap. A3, 458 p., <https://doi.org/10.3133/tm4a3>. [Super-sedes USGS Techniques of Water-Resources Investigations, book 4, chap. A3, version 1.1.]

LADEIRA, M. I., Espaço geográfico Guarani-Mbya: significado, constituição e uso. Maringá: EDUEM, 2008.

Raimundo, I. C. (2021). Análise e Previsão de Marés e Correntes de Maré: Desenvolvimento da Ferramenta e Aplicação Prática (Dissertação de Mestrado). Escola Naval, Alfeite.

ROSMAN, P.C.C. (2025) Referência técnica do SisBaHiA. Rio de Janeiro: Escola Politécnica da Área de Engenharia.

Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Resolução nº 024/2006/SEMA. Institui as diretrizes para a gestão de Bacias Hidrográficas no estado do Paraná. Curitiba, PR, 2006

SANT'ANA, D. O. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica do rio Guaraguaçu e afluentes na análise da intrusão salina na taxa de renovação. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

WELCH, P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967.