

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE SÉRIES TEMPORAIS DE MARÉ NA BAÍA DE GUARATUBA – PR

*Aline Trog Ferreira¹ ; Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha²; Danilo Oliveira Sant'Ana³,
Alexandre Fabio Rojas Alvarez³; José Eduardo Gonçalves⁴*

Abstract: This study sought to identify the dominant periodic oscillations and analyze their seasonal variability in the water level time series simulated by the two-dimensional hydrodynamic model SisBaHiA[®] and in the data measured in the Guaratuba Bay, Paraná, applying the Fast Fourier Transform (FFT). The spectral analysis highlighted main peaks around 12.2 hours and 24.4 hours, corresponding to the semi-diurnal and diurnal tides, respectively, present in both simulated and measured data. Smaller components related to meteorological oscillations were also detected. The comparison between the summer and winter periods, with marked hydrological differences, revealed greater spectral complexity and fluvial influence in the summer, and greater dominance of tides in the winter. In addition, the SisBaHiA[®] model demonstrated good agreement with the observations, especially in the summer. Thus, the application of the FFT allowed the decomposition of the signals and understanding the relative influence of the tide and river discharge on the local dynamics, contributing to the characterization of the hydrodynamic processes of Guaratuba Bay under different seasonal conditions.

Resumo: Este estudo buscou-se identificar as oscilações periódicas dominantes e analisar sua variabilidade sazonal das séries temporais de nível d'água simuladas pelo modelo hidrodinâmico bidimensional SisBaHiA[®] e aos dados medidos na Baía de Guaratuba, Paraná, aplicando-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT). A análise espectral, destacou picos principais em torno de 12,2 horas e 24,4 horas, correspondentes às marés semi-diurna e diurna, respectivamente, presentes tanto em dados simulados quanto medidos. Foram também detectadas componentes menores relacionadas a oscilações meteorológicas. A comparação entre os períodos de verão e inverno, com diferenças hidrológicas marcantes, revelou maior complexidade espectral e influência fluvial no verão, e maior dominância das marés no inverno. Além disso, o modelo SisBaHiA[®] demonstrou boa concordância com as observações, especialmente no verão. Dessa forma, a aplicação da FFT permitiu decompor os sinais e compreender a influência relativa da maré e da descarga fluvial na dinâmica local, contribuindo para a caracterização dos processos hidrodinâmicos da baía de Guaratuba em diferentes condições sazonais.

Palavras-Chave – Transformada Rápida de Fourier, Guaratuba, SisBaHiA.

1) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, alinetrog@ufpr.br

2) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, cynara@ufpr.br

3) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, danilooliveira@ufpr.br

4) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, alexandre.fabio@ufpr.br

5) Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná, Curitiba, Paraná, jose.eduardo@simepar.br

1. INTRODUÇÃO

Eventos extremos têm se tornado cada vez mais frequentes em diversas partes do mundo, gerando impactos ambientais, sociais e econômicos significativos (Shafizadeh-Mogham et al., 2018). Fenômenos como inundações, ondas de calor e frio, secas, deslizamentos, furacões e tempestades podem ser intensificados por fatores como precipitações intensas e alterações no uso e ocupação do solo (Ruezzene et al., 2021). Nesse contexto, o monitoramento de variáveis hidrológicas, como as precipitações, os escoamentos superficiais e subsuperficiais, considerando os padrões climáticos e as sazonalidades, é fundamental para a compreensão dos processos hidrodinâmicos em bacias hidrográficas e regiões costeiras, refletindo diretamente sobre os dados de nível ou vazão.

Diante da vulnerabilidade observada em muitas regiões do país, a análise de séries temporais de variáveis hidrológicas, permite identificar padrões e periodicidades associadas a ciclos dominantes (Pyatkova et al., 2019). Para essa finalidade, métodos de análise espectral são ferramentas importantes, pois possibilitam a avaliação da presença de frequências significativas em séries temporais, mesmo que curtas (Capozzoli et al., 2017).

Entre essas técnicas, destaca-se a análise espectral de Fourier, que permite decompor uma série temporal em suas componentes harmônicas, identificando as frequências que explicam a maior parte da variância dos dados ao longo do tempo (Bozzo et al., 2010).

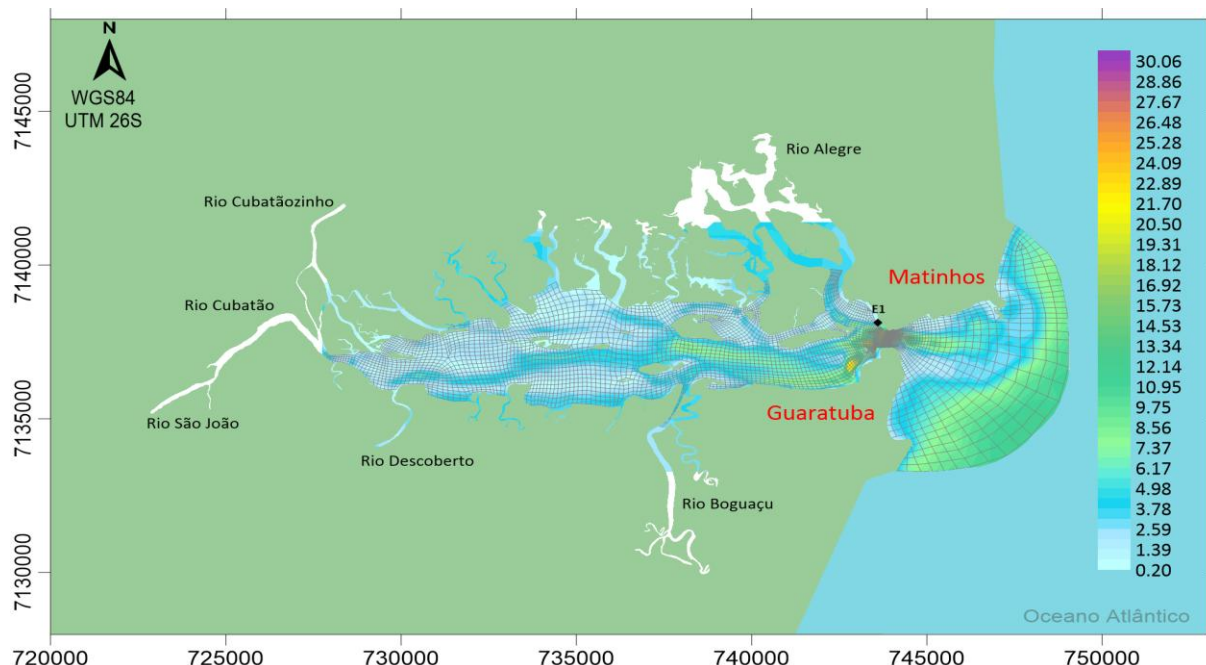
Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) às séries temporais de nível d'água simuladas pelo modelo SisBaHiA[®] e aos dados medidos na baía de Guaratuba, com a finalidade de decompor os sinais e identificar as oscilações de maior período. A análise foi realizada para dois períodos distintos: verão e inverno; que apresentam características hidrológicas distintas, sendo caracterizado por maior vazão fluvial no verão e menor vazão no inverno. Essa abordagem permite avaliar de forma comparativa a influência da maré meteorológica e da descarga fluvial sobre a hidrodinâmica local, contribuindo para a compreensão dos processos que atuam nas variações de nível d'água em diferentes contextos sazonais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A Baía de Guaratuba está situada no litoral do Estado do Paraná, sendo limitada, a oeste, pela Serra do Mar e, a leste, pelo Oceano Atlântico. Sua conexão com o oceano ocorre através de uma estreita abertura de cerca de 500 metros de largura, delimitada ao norte pela Serra da Prata e ao sul pelo Morro de Guaratuba.

A Figura 1 apresenta o domínio adotado na modelagem, no qual também se visualiza a malha de elementos finitos quadráticos composta por 1.268 elementos e 5.492 nós. A discretização do domínio foi realizada com elementos quadrangulares subparamétricos do tipo Lagrangeano. Além disso, são indicados os principais cursos d'água, a estação de coleta de dados e a batimetria da baía, esta última elaborada com base na carta náutica nº 1803, fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), complementada por informações disponibilizadas pelo Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar).

Figura 1 – Domínio de modelagem, malha de elementos finitos, batimetria da Baía de Guaratuba e a localização da estação de coleta de dados.



O clima da região é classificado como subtropical úmido, apresentando uma média anual de precipitação que varia entre 1750 a 2000 mm, onde o verão é a estação mais chuvosa e o inverno a mais seca (Masunari, 2006). O regime de marés da região é caracterizado como semi-diurno, apresentando amplitudes de marés menores que dois metros na sizígia, caracterizando um regime de micromaré (Marone et al., 1997).

A simulação do modelo hidrodinâmico foi realizada para um período de 365 dias, compreendido entre 01/01/2023 a 31/12/2023, com objetivo de capturar de forma abrangente as variações sazonais e maximizar a representatividade dos processos hidrodinâmicos. Foram empregados dados de vento obtidos a partir de 2 estações (Tabela 1) de reanálise do ECMWF-ERA (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), além de dados medidos na Estação de Morretes (A873). A curva de maré astronômica foi derivada do modelo FES (*Finite Element Solution*), enquanto a maré meteorológica foi obtida a partir dos dados de elevação do nível do mar gerados pelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*).

Os dados de maré medidos na baía de Guaratuba foram obtidos na estação E1, conforme ilustrado na Figura 1, cujas coordenadas são 743491.0000 e 7138176.0000. Esses dados foram fornecidos pelo SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), abrangem o período de 01/01/2023 a 31/12/2023, com registros realizados a cada 10 minutos.

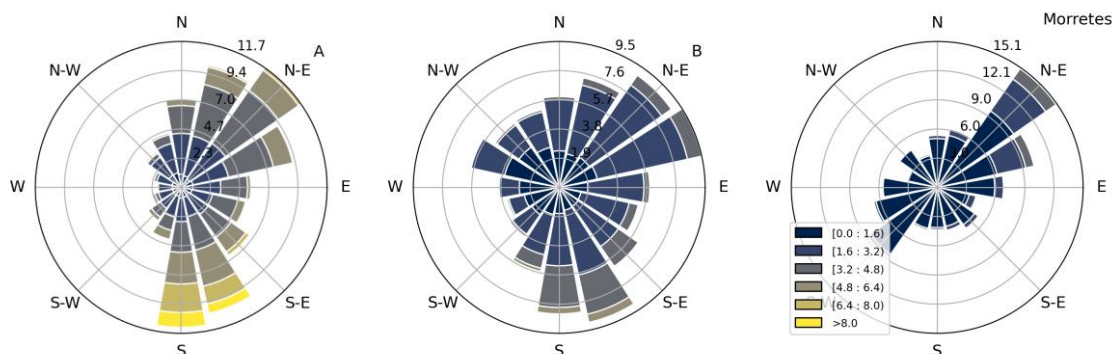
Em relação ao vento, assumiu-se como variável, sendo que as rosas dos ventos (Figura 2) indicam predominância das direções nordeste e sul-sudeste para as estações A e B, e das direções nordeste e sudoeste para a estação Morretes. As intensidades médias do vento: 3,56 m/s para A, 2,08 m/s para B e 0,63 m/s para C, demonstrando a pouca influência do vento na circulação.

Tabela 1 – Coordenadas das estações obtidas do ECMWF-ERA (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e dados medidos na Estação Morretes.

Estação	Coordenada X	Coordenada Y
---------	--------------	--------------

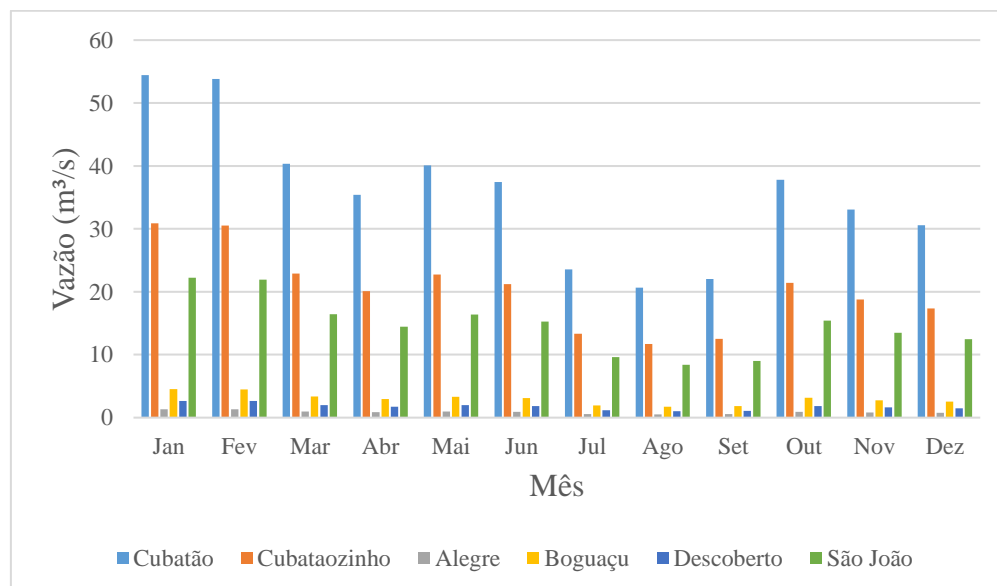
A	765489.0496	7132707.4420
B	740433.3291	7133190.0750
Morretes	745660.0000	7140948.0000

Figura 2 – Rosa dos ventos para as estações obtidas de dados de reanálise do ECMWF-ERA e dados medidos na estação Morretes (A873) para todo o período modelado (01/01/2023 a 31/12/2023).



Os dados de vazão utilizados são provenientes do Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (Consórcio Maia Melo, 2022) da Ponte de Guaratuba, que utilizou dados de vazão média para os principais rios, conforme ilustrado na Figura 3. Observa-se que as vazões são maiores no verão e menores no inverno, sendo que os rios Cubatão, Cubatãozinho e São João apresentam as maiores contribuições. A localização dos rios podem ser observadas na Figura 1.

Figura 3 – Vazão média mensal dos principais rios da Baía de Guaratuba e sua área de drenagem. Consórcio Maia Melo (2022).



Embora a simulação hidrodinâmica tenha sido realizada para todo o ano de 2023, com o objetivo de obter resultados representativos das condições sazonais que caracterizam a Baía de Guaratuba, a análise espectral por Transformada Rápida de Fourier (FFT) foi aplicada especificamente aos dados simulados e medidos referentes aos meses de janeiro e junho. Esse recorte temporal foi definido em função das diferenças hidrológicas marcantes entre as estações, com maior vazão fluvial no verão e menores vazões no inverno, quando predomina um período mais seco.

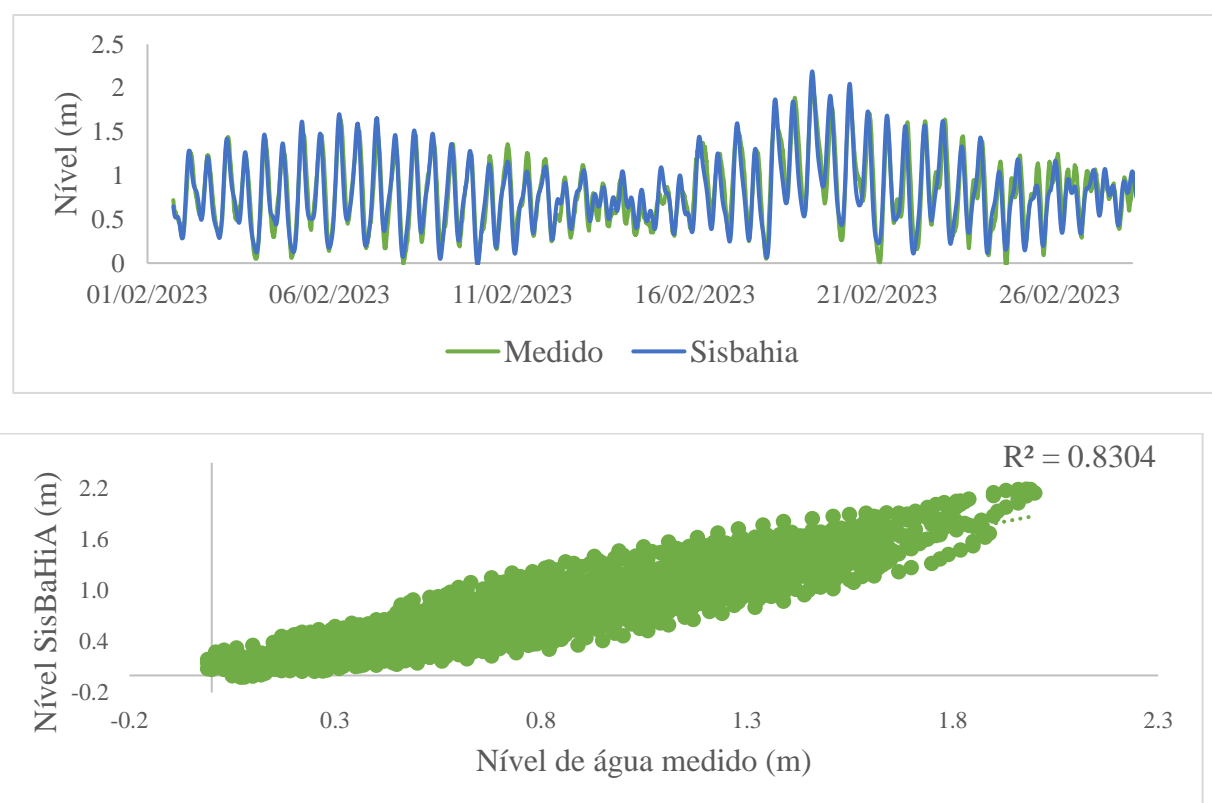
A aplicação da análise espectral, realizada com o auxílio do *software Python*, teve como principal finalidade identificar e isolar as oscilações de maior período presentes nas séries temporais de nível d'água, possibilitando a avaliação da influência da maré meteorológica e da descarga fluvial sobre a hidrodinâmica local. Este procedimento é fundamental para a caracterização do aporte fluvial e para a compreensão da dinâmica do sistema estuarino.

A escolha do parâmetro de frequência para a filtragem espectral é um aspecto crítico nesse processo, uma vez que frequências menores resultam em amplitudes residuais mais elevadas e, conseqüentemente, em uma maior separação entre os componentes aleatórios. Por outro lado, uma filtragem excessiva pode eliminar sinais relevantes, prejudicando a interpretação adequada do comportamento do sistema. No presente estudo, após a realização de testes preliminares, optou-se pela aplicação de uma filtragem com janela de 24 horas, considerada adequada para preservar as principais componentes de interesse sem comprometer a integridade dos sinais hidrodinâmicos analisados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

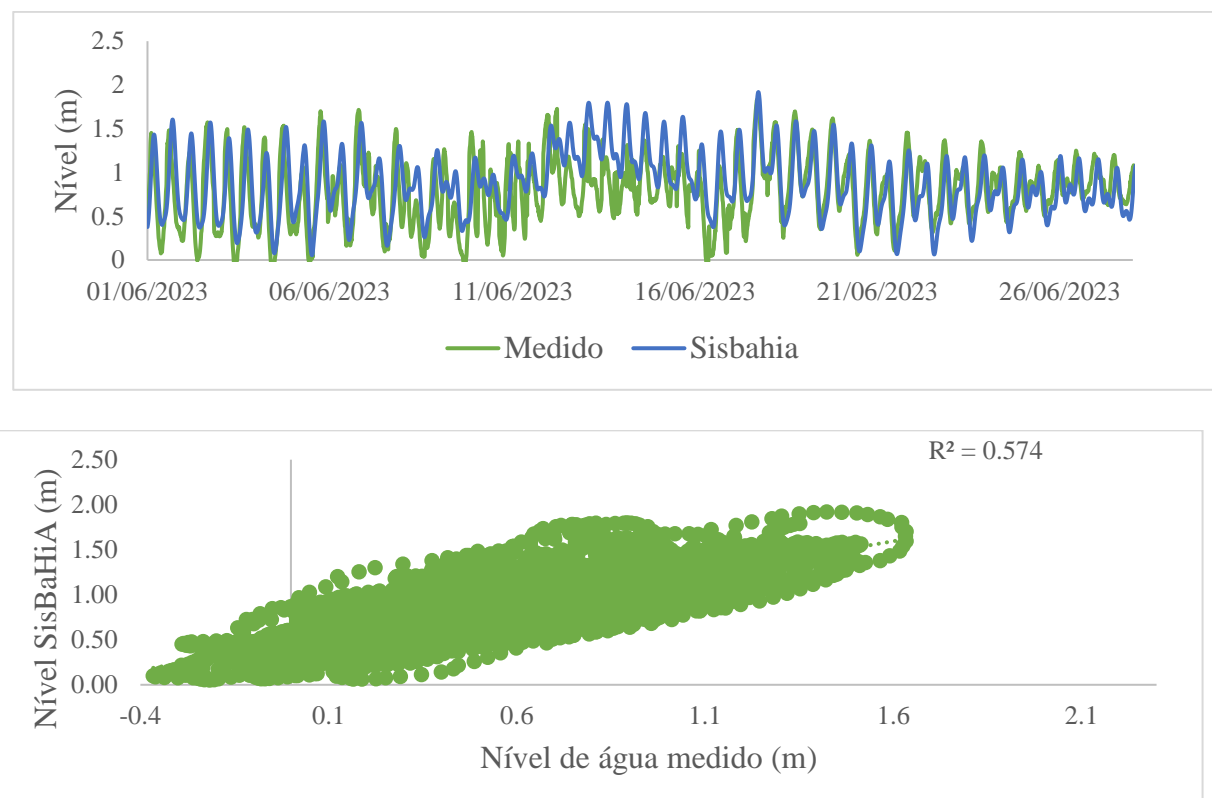
A calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada de 01/01/2023 a 28/02/2023 e de 01/06/2023 a 28/06/2023. A Figura 4 apresenta os resultados de nível na estação E1, comparando os dados medidos com aqueles obtidos por meio da simulação realizada pelo modelo SisBaHiA[®] para o mês de fevereiro. Os resultados simulados mostram excelente concordância com os dados medidos, tanto em relação à fase quanto à amplitude. Os parâmetros estatísticos calculados confirmam a precisão da simulação, com um coeficiente de correlação (R^2) elevado, igual a 0,8304.

Figura 4 – Comparação entre os dados medidos e os dados simulados pelo SisBaHiA[®] para o mês de fevereiro (verão) e diagrama de dispersão na estação E1, para o período de 01/01/2023 a 28/02/2023.



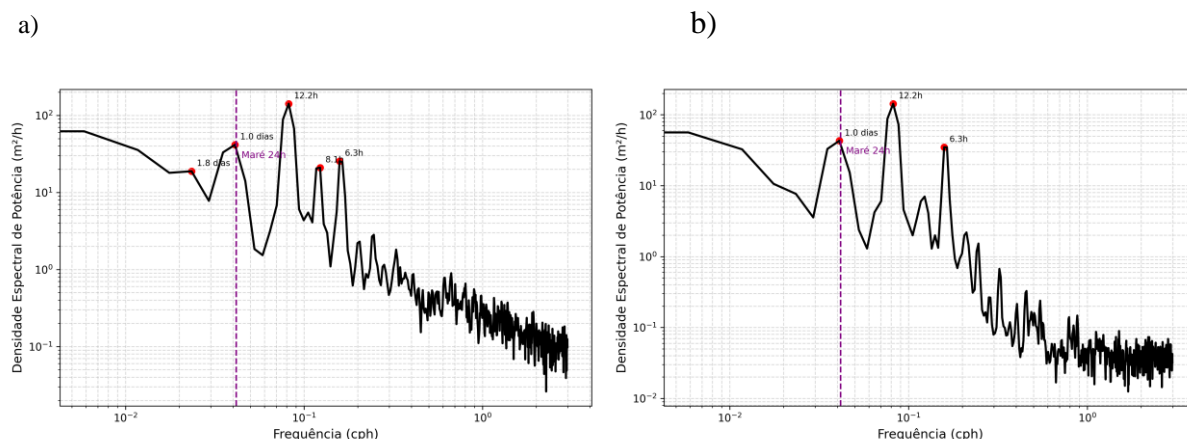
A Figura 5 apresenta os resultados de nível na estação E1, comparando os dados medidos com os resultados obtidos pela simulação realizada com o modelo SisBaHiA para o mês de junho. Observa-se que a concordância entre os dados simulados e medidos foi satisfatória, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,574.

Figura 5 – Comparação entre os dados medidos e os dados simulados pelo SisBaHiA® para o mês de junho (inverno) e diagrama de dispersão na estação E1, para o período de 01/06/2023 e 28/06/2023.



Na Figura 6 são apresentadas a comparação entre as densidades espectrais para os períodos analisados. A análise foi realizada com o objetivo de identificar as principais componentes periódicas associadas à dinâmica do sistema. Em ambos os espectros observa-se a presença de picos de energia nas faixas de frequência associadas as componentes de maré diurnal (~24 horas), semi-diurna (~12 horas) e menores (~6,3 horas). Além disso, destacam-se as componentes de baixa frequência, com períodos mais longos, associadas às variações meteorológicas e fluviais, como indicado pelas marcas próximas a 1,8 e 1,0 dias.

Figura 6 – Densidade espectral de potência para o período de 01/02/2023 a 28/02/2023 para os dados medidos (a) e simulados pelo SisBaHiA (b).

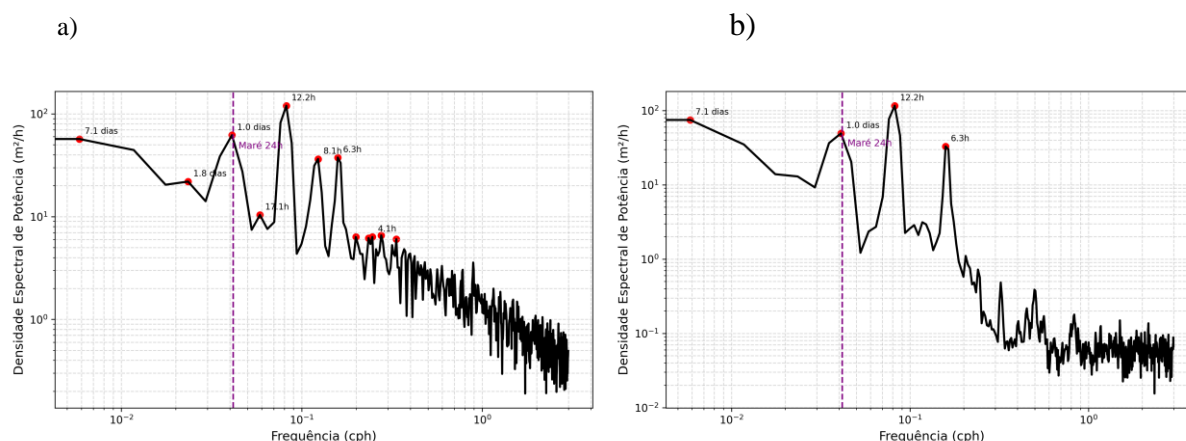


Comparando-se os dois espectros, verifica-se que a estrutura geral das componentes é semelhante, com todos os principais picos identificados. Contudo, algumas diferenças podem ser observadas. No espectro (a), o pico associado ao período de aproximadamente 12,2 horas apresenta maior intensidade relativa, sugerindo uma maior predominância da forçante semi-diurna neste conjunto de dados. Já no espectro (b), embora este pico também esteja presente, observa-se um leve aumento na energia associada à componente sub-diurna (~6,3 horas). Além disso, não é possível observar o pico de 1,8 dias.

A Figura 7 ilustra os espectros de densidade spectral de potência obtidos para o mês de junho, representativo do período de inverno. Em ambos os espectros observa-se a dominância clara das componentes associadas à maré diurna (~24 horas) e sub-diurna (~12,2 horas), bem como sub-harmônica (~6,3 horas), evidenciadas pelos picos de energia.

No espectro (a), observa-se múltiplos picos destacados, incluindo componentes dos períodos (1,8 dias e 1,0 dia), além de oscilações sub-diurnas adicionais (~8,1 hora e ~4,1 horas). A presença de componentes de baixa frequência sugere que, há influência de processos de larga escala, possivelmente relacionados a forçantes meteorológicas, como frentes frias, que podem gerar oscilações de maior período. O espectro (b) há uma atenuação da energia associada às baixas frequências, com a energia concentrando-se principalmente nas componentes harmonicas de maré.

Figura 7 – Densidade spectral de potência para o período de 01/06/2023 a 28/06/2023 para os dados medidos (a) e simulados pelo SisBaHiA (b).



A análise espectral dos dados de nível d'água revelou a presença de frequências dominantes associadas principalmente aos forçantes astronômicos, notadamente as marés semi-diurnas e diurnas. Em ambos os períodos destacam-se os picos de energia em torno de 12,2 horas e 24 horas, correspondentes aos ciclos semi-diurno e diurno das marés, respectivamente. Estes componentes são característicos de sistemas estuarinos e evidenciam que a dinâmica local é fortemente condicionada pelo regime de maré. Nos dois períodos não é possível observar picos de energia associados ao aporte fluvial.

Nos espectros correspondentes a janeiro, observa-se uma maior complexidade no padrão energético, com a presença de múltiplos picos secundários, especialmente entre as frequências superiores a 6,3 horas. Em contraste, durante junho, verifica-se uma redução na complexidade espectral, com menos picos secundários expressivos e uma maior dominância das componentes de maré. A menor contribuição fluvial característica do inverno resulta em uma atenuação das oscilações associadas aos processos de interação entre vazão e maré.

De modo geral, a comparação entre os períodos revela que, embora a vazão fluvial apresente um comportamento sazonal, sua contribuição no sistema analisado não é suficientemente significativa para alterar o padrão dominante de oscilação, que permanece fortemente governado pelas marés.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a importância da análise espectral como ferramenta para a identificação e compreensão das principais componentes periódicas que influenciam a hidrodinâmica da Baía de Guaratuba. A aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) aos dados medidos e simulados permitiu detectar os picos de energia associados aos ciclos semi-diurnos e diurnos, com destaque para os períodos de aproximadamente 12,2 horas e 24,4 horas, respectivamente.

Além disso, observou-se que o modelo hidrodinâmico bidimensional do SisBaHiA® foi capaz de reproduzir adequadamente as principais oscilações observadas nos dados medidos, sobretudo no verão, quando a resposta do modelo foi mais satisfatória.

Por fim, a análise comparativa entre os meses de janeiro e junho revelou variações sazonais no padrão energético. Em janeiro, observa-se uma maior complexidade espectral, com múltiplos picos secundários especialmente em frequências superiores a 6,3 horas, possivelmente relacionados ao aumento da descarga fluvial típica do verão. Já em junho, durante o inverno, a complexidade diminui, com menor presença desses picos secundários e maior predominância das componentes associadas às marés, refletindo a redução da influência fluvial nessa época do ano. Apesar dessas variações sazonais na vazão fluvial, a contribuição desta não foi suficiente para alterar o padrão dominante de oscilação, que permanece majoritariamente governado pelas marés.

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

REFERÊNCIAS

- BOZZO, E.; CARNIEL, R.; FASINO, D. (2010). "Relationship between Singular Spectrum Analysis and Fourier analysis: Theory and application to the monitoring of volcanic activity". *Computers and Mathematics with Applications*. v. 60, p. 812-820.
- CAPOZZOLI C. R.; CARDOSO, A. de O.; FERRAZ, S. E. T. (2017). "Padrões de Variabilidade de Vazão de Rios nas Principais Bacias Brasileiras e Associação com Índices Climáticos". *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 2, pp.243-254.
- MARONE, E.; MANTOVANELLI, A.; NOERNBERG, M. A.; KLINGENFUSS, M. S.; LAUTERT, L. F. C.; PRATA JUNIOR, V. P. (1997). "Caracterização física do complexo estuarino de Paranaguá". Pontal do Sul: UFPR. Relatório consolidado do convênio APPA/CEM.
- MASUNARI, S. (2006). "Distribuição e abundância dos caranguejos *Uca* Leach (Crustacea, Decapoda, Ocypodidae) na Baía de Guaratuba, Paraná, Brasil". *Revista Brasileira de Zoologia*, 4, pp. 901-914.
- PYATKOVA, K.; CHEN, A. S.; BUTLER, D.; VOJINOVIC, Z.; DJORDJEVIC, S. (2019). "Assessing the knock-on effects of flooding on road transportation". *Journal Of Environmental Management*, v. 244, pp.48-60.
- RUEZZENE, C. B. et al. (2021). "Determinação de frequências dominantes em dados de vazão no Município de Governador Valadares – MG". In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2021, pp.
- SHAFIZADEH-MOGHADAM, H.; VALAVI, R.; SHAHABI, H.; CHAPI, K.; SHIRZADI, A. (2018). "Novel forecasting approaches using combination of machine learning and statistical models for flood susceptibility mapping". *Journal of Environmental Management*, v. 217, pp.1-11.