

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME WINSTON DA SILVA OLIVEIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO HIDRODINÂMICO E DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS APÓS ENGORDAMENTO ARTIFICIAL DE AREIA NA ORLA DE
MATINHOS-PR

CURITIBA

2025

GUILHERME WINSTON DA SILVA OLIVEIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO HIDRODINÂMICO E DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS APÓS ENGORDAMENTO ARTIFICIAL DE AREIA NA ORLA DE
MATINHOS-PR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, no Setor de Tecnologia, na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Gonçalves

Coorientador: Dr. Danilo Mildemberger de Oliveira

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Oliveira, Guilherme Winston da Silva
Implementação de modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos
após engordamento artificial de areia na orla de Matinhos-PR / Guilherme
Winston da Silva Oliveira. – Curitiba, 2025.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos
Hídricos e Ambiental.

Orientador: José Eduardo Gonçalves
Coorientador: Danilo Mildemberger de Oliveira

1. Estruturas marítimas. 2. Correntes oceânicas. 3. Erosão de praias. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Gonçalves, José Eduardo.
IV. Oliveira, Danilo Mildemberger de. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **GUILHERME WINSTON DA SILVA OLIVEIRA**, intitulada: **Implementação de modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos após engordamento artificial de areia na orla de Matinhos - PR**, sob orientação do Prof. Dr. **JOSÉ EDUARDO GONÇALVES**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Maio de 2025,

Assinatura Eletrônica
27/05/2025 17:56:59,0
JOSÉ EDUARDO GONÇALVES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
27/05/2025 21:29:15,0
MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ -
CURITIBA)

Assinatura Eletrônica
22/06/2025 22:25:02,0
JOSÉ JUNJI OTA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
27/05/2025 20:14:32,0
TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
28/05/2025 08:50:51,0
DANILO MILDEMBERGER DE OLIVEIRA
Coordenador(a)

"Sou um grão de areia"

Renato Russo — *Pais e Filhos*, Legião Urbana

RESUMO

O município de Matinhos-PR passou por um intenso processo de alteração da sua orla com o intuito de controlar as severas erosões que a infraestrutura da cidade sofria em decorrência de ressacas, especialmente nas marés de sizígia. Este estudo busca a implementação de um modelo hidrodinâmico, associado ao modelo de geração e propagação de ondas SWAN, para simular o transporte de sedimentos no litoral de Matinhos-PR após a realização de uma alimentação artificial de areia e da construção de estruturas marítimas perpendiculares à linha de costa para sua proteção, com o objetivo de estimar os efeitos das intervenções realizadas nos deslocamentos das correntes e dos sedimentos nas proximidades da praia. O modelo foi implementado através do software Delft3D a partir da batimetria, da série temporal de níveis do mar, dados de ventos e ondas para simular as principais forçantes para o transporte de sedimentos. Os resultados demonstraram que o modelo foi capaz de representar os efeitos das estruturas marítimas e sua interface com o mar, além de possibilitar uma avaliação comparativa entre o cenário atual da orla de Matinhos e o cenário sem as estruturas marítimas como forma de verificar os efeitos da implementação do conjunto de proteção costeira. Por meio desse comparativo, os cenários simulados permitiram observar maiores tendências para acúmulos nas estruturas mais extensas, bem como permitiu perceber tendências mais erosivas no cenário sem a implementação das estruturas marítimas.

Palavras chave: estruturas marítimas; correntes litorâneas; erosão costeira, Delft3D, SWAN.

ABSTRACT

The city of Matinhos, in the state of Paraná (Brazil), has undergone an intense shoreline modification process aimed at controlling severe erosion affecting the city's infrastructure due to storm surges, particularly during spring tides. This study aims to implement a hydrodynamic model, coupled with the SWAN wave generation and propagation model, to simulate sediment transport along the coast of Matinhos following a beach nourishment intervention and the construction of coastal structures perpendicular to the shoreline for its protection. The goal is to estimate the effects of these interventions on current patterns and sediment displacement near the beach. The model was implemented using the Delft3D software, based on bathymetric data, time series of sea elevations, wind, and wave data, in order to simulate the main forcing conditions for sediment transport. The results showed that the model was able to represent the effects of the coastal structures and their interaction with the marine environment, as well as enable a comparative assessment between the current shoreline configuration of Matinhos and a hypothetical scenario without the structures, as a means to evaluate the impact of the coastal protection system. Through this comparison, the simulated scenarios revealed a greater tendency for sediment accumulation around the more extensive structures, while more erosive trends were observed in the scenario without the implementation of the coastal defenses.

Keywords: rubble mound breakwaters; longshore currents; coastal erosion; Delft3D; SWAN.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	ÁREA DE ESTUDO	12
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	Levantamentos topobatimétricos.....	15
3.2	Modelagem numérica computacional	18
3.3	Configuração do modelo numérico computacional	20
3.4	Inserção das estruturas marítimas	21
3.5	O modelo de ondas e de acoplamento.....	22
3.6	Parâmetros sedimentológicos.....	25
4.	RESULTADOS.....	26
4.1	Morfologia da área de estudo.....	26
4.2	Níveis de água e alturas de ondas	27
4.3	Processos hidrodinâmicos e dinâmica dos sedimentos	31
5.	DISCUSSÃO.....	41
6.	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE 1	48

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO HIDRODINÂMICO E DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS APÓS ENGORDAMENTO ARTIFICIAL DE AREIA NA ORLA DE MATINHOS-PR

Guilherme Winston da Silva Oliveira¹, Danilo Mildemberger de Oliveira, José Eduardo Gonçalves²

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

²Sistema Meteorológico do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

**E-mails: guilherme.winston@ufpr.br, danilo.mildemberger@outlook.com,
jose.eduardo@simepar.br**

Revista alvo para publicação: Revista Brasileira de Recursos Hídricos

ISSN 2318-0331

Conceito Qualis: A3

1. INTRODUÇÃO

A zona costeira brasileira é enormemente impactada pela ação humana devido a uma densa ocupação urbana que remete ao processo histórico de ocupação territorial do Brasil. Uma das possíveis consequências dessa densa ocupação é a erosão costeira, que se caracteriza por um processo que ocorre ao longo da linha de costa decorrente do balanço sedimentar negativo (SOUZA, et al., 2005).

Esse processo ocorre devido à atuação integrada de fontes terrestres, oceânicas e atmosféricas que modificam constantemente as características de ambientes costeiros em diferentes escalas de tempo, a partir da interação entre ventos, ondas, marés e correntes litorâneas, gerando um ambiente fisicamente complexo, principalmente na plataforma continental próxima, onde ocorrem as principais forçantes que controlam o processo de ação das ondas (ALBERTI, 2010).

Ao se aproximarem das praias, as ondas geradas em alto mar pelo vento têm parte de sua energia dissipada em decorrência do atrito causado pelo movimento do fluxo de água próximo ao leito oceânico (PUTNAM E JOHSON, 1949). Ao quebrarem, as ondas geram correntes que desempenham papel importante no transporte de sedimentos e morfologia da costa (ZANG et al, 2018). Essas correntes se dividem em longitudinais e transversais – a primeira, se apresenta paralela a linha de costa e transporta sedimentos pelo processo de deriva litorânea; a segunda se apresenta perpendicular a linha de costa e atravessam a zona de surf como forma de correntes de retorno (STELLFELD, 2019).

No litoral do Paraná, conforme apontado por Veiga (2004) e Nemes e Marone (2013), correntes associadas a eventos de sistemas frontais originados no sul ocasionam o deslocamento da deriva litorânea predominantemente de sul para norte. No entanto, por estarem diretamente ligadas ao padrão das ondas, essas correntes apresentam

variações significativas, podendo inverter sua direção ou até desaparecer em certos períodos (ALBERTI, 2010).

Tal cenário de dinâmica costeira, associado a ocupação inadequada do solo (ANGULO, et al., 2018), provocou um desequilíbrio entre erosão e acreção de sedimentos na área de estudo, exigindo ações no sentido de corrigir ou atenuar esse efeito.

Com este panorama e frente a severos cenários de ressaca e regressão da linha de costa, o Estado do Paraná iniciou, em 2022, um projeto de recuperação da Orla de Matinhos, promovendo o avanço em até 100 metros da linha de praia e a reposição de aproximadamente 2.758.756 m³ de areia. O projeto incluiu ainda a construção de estruturas semirrígidas através de dispositivos de enrocamento, com o intuito de proteger a engorda artificial de areia e atenuar novos processos erosivos (AQUAMODELO, 2021).

A intervenção ocorreu, inicialmente, com a implantação de 5 (cinco) estruturas, nominalmente:

- a) Guia Corrente da Avenida Paraná, formado por dois espigões sul e norte, com 207 e 161 metros, respectivamente. Seu objetivo é diminuir o assoreamento na desembocadura do canal de drenagem da Avenida Paraná;
- b) Espigão da Praia Brava, com 85 metros de extensão e objetivo de proteger o alargamento da faixa de areia;
- c) Guia Corrente do Rio Matinhos, formado por dois espigões sul e norte, com 327 e 180 metros, respectivamente. Seu objetivo é estabilizar a desembocadura do Rio Matinhos, diminuindo o assoreamento dos sólidos carreados pela drenagem urbana;
- d) Headland Balneário Riviera, com 138 metros de comprimento e com a função de estabilizar a areia caso haja recuo da linha de praia;

- e) Headland Balneário Flórida, com as mesmas dimensões e funções do Headland Balneário Riviera.

Deste modo, o presente trabalho parte da hipótese de que as estruturas marítimas influenciarão no transporte de sedimentos nos trechos engordados artificialmente, concentrando-se na configuração da nova batimetria após o preenchimento de areia, na aplicação de dados de entrada para a modelagem numérica e na implementação do modelo hidrodinâmico Delft3D e de transporte de sedimentos associado ao modelo SWAN para geração e propagação de ondas.

Moreira (2019) realizou um estudo com propósito semelhante ao desenvolver um modelo numérico computacional MOHID simulando a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos acoplado ao modelo de ondas SWAN antes das obras de engordamento e proteção costeira realizadas em 2022. Em seu modelo, Moreira estudou o transporte de sedimentos para o período de junho a setembro de 2018, intervalo este com ausência de grandes ressacas. Mais tarde, o autor indicou a necessidade de novos estudos utilizando a batimetria atualizada e uma abordagem que considerasse a evolução da batimetria nos resultados (MOREIRA et al, 2024), aspecto o qual o modelo aplicado neste trabalho buscou implementar.

Franz et al (2017) demonstraram que o acoplamento entre um modelo hidrodinâmico e o modelo de ondas SWAN podem ser úteis em estudos de engenharia que objetivam avaliar soluções de proteções costeiras contra erosão. Oliveira et al (2020), avaliaram a interação entre ondas e um quebra-mar submerso na costa de Portugal utilizando o modelo Delft3D bidimensional, indicando que o modelo representou adequadamente os padrões de circulação dominantes nas vizinhanças da estrutura e a evolução da linha de costa, em detrimento de modelos mais simples. Visser (2002), ao aplicar o modelo Delft3D para avaliar o impacto das marés nas vizinhanças de um espigão,

indicou a importância da aplicação do modelo de ondas SWAN acoplado ao modelo hidrodinâmico para resultados mais exitosos, uma vez que o modelo gerador e propagador de ondas pode ser aplicado na mesma grade numérica do modelo hidrodinâmico, simplificando a implementação de estruturas marítimas e reduzindo erros de interpolação.

O modelo de ondas SWAN é integrado à abordagem para representar de forma detalhada os processos relacionados à dinâmica das ondas, incluindo geração, propagação, refração, *shoaling* (aumento da altura da onda com a diminuição da profundidade), interações não lineares entre ondas (quádruplas e triplas) e os mecanismos de dissipação, como *whitecapping* (espuma gerada pelo vento), atrito com o fundo e quebra induzida pela profundidade (FRANZ et al., 2017).

Essa abordagem permite a integração de processos costeiros como hidrodinâmica, turbulência, advecção/difusão de sedimentos em suspensão, erosão/deposição, transporte de sedimentos de fundo (*bed load*) e evolução morfológica (FRANZ et al., 2017).

Segundo Franz et al (2017), para resolver as equações de movimento e de continuidade, são necessárias condições de contorno apropriadas nas fronteiras do modelo (como terra e mar aberto), na superfície e no fundo, sendo as condições de contorno abertas – nas quais os valores de determinadas variáveis (como o nível da maré) são impostos diretamente no contorno do modelo – empregadas neste estudo, uma forma comum em modelos costeiros para simular as oscilações do nível do mar nas fronteiras abertas do domínio.

Deste modo, o objetivo geral deste estudo é a implementação de um modelo computacional que represente o efeito das estruturas marítimas construídas na orla de Matinhos a partir de uma reprodução das novas condições batimétricas da faixa de areia, acoplando simulações de processos hidrodinâmicos, ondas e transporte de sedimentos, tendo como objetivos específicos:

- a) Simular a dinâmica costeira dentro do período avaliado, considerando a evolução morfológica da região estudada;
- b) Estabelecer uma compreensão inicial da influência das estruturas marítimas implementadas na Orla de Matinhos no transporte de sedimentos em diferentes condições, considerando a situação com e sem estruturas marítimas.

Por fim, espera-se que os resultados e as conclusões obtidas contribuam para trabalhos futuros ao investigar os efeitos das estruturas marítimas no transporte de sedimentos em diferentes cenários, e possa trazer à luz a importância do acompanhamento e monitoramento contínuo das intervenções de engenharia realizadas na orla de Matinhos.

2. ÁREA DE ESTUDO

Localizada ao sul do Brasil, o município de Matinhos ($25^{\circ} 49' 8''$ S e $48^{\circ} 32' 29''$ W) possui sua extensão no sentido longitudinal à costa orientada no sentido nordeste-sudeste (Figura 1). Sua praia possui morfologia intermediária a dissipativa e seu arco praial está orientado aproximadamente 24° em relação ao norte, de modo que a direção de onda perpendicular a ela incida com 114° de inclinação (MOREIRA, 2019).

Segundo Angulo et al (2018), o município está contemplado em uma região com clima de planície costeira do tipo subtropical úmido, caracterizada por uma circulação atmosférica definida por centros de ação anticiclônicos e pela passagem de massas polares frias que, por sua vez, definem a dinâmica de ventos e ondas na região – com predominância de ventos oriundos do quadrante leste, sudeste e sul.

Conforme o mesmo autor, a propagação de ondas no litoral sul possui seus centros formadores afastados da costa e independentes das direções de ventos locais, sendo que

a ocorrência simultânea da intensificação de forçantes como os ventos de sul-sudeste, o aumento do nível do mar e as ondas são fatores que potencializam os processos de erosão costeira.

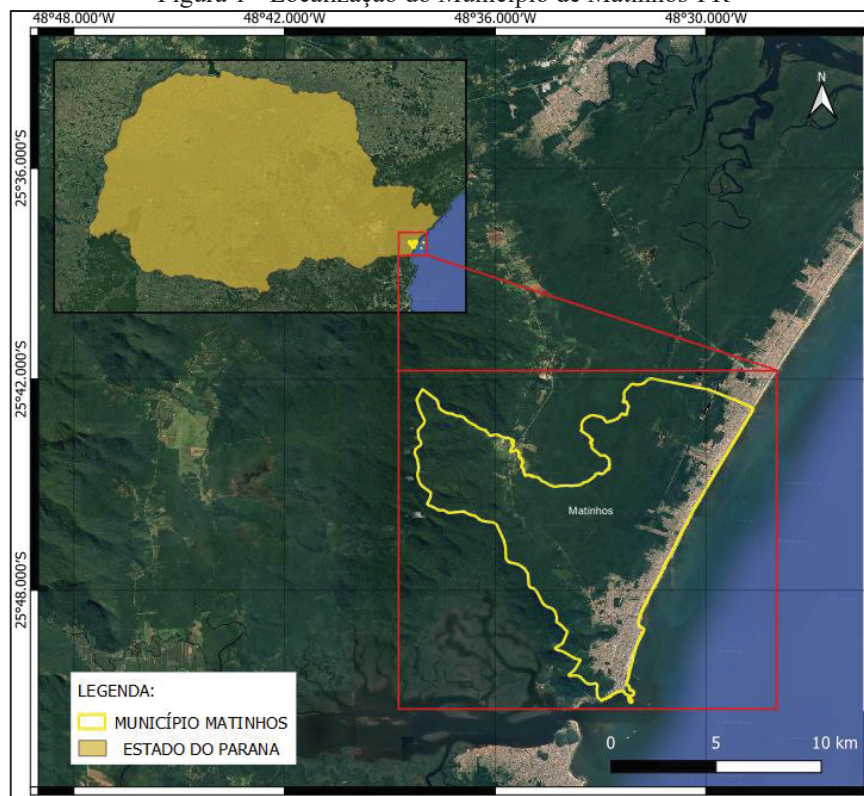
Estudos no litoral paranaense realizados por Noernberg e Alberti (2014) indicaram que oscilações de baixa frequência, seguidas por marés com fluxos predominantes para norte e componentes longitudinais de vento dominam a formação de correntes longitudinais, que possuem capacidade de transportar sedimentos de fundo quando da ocorrência de eventos de alta energia (ANGULO et al., 2018). Noernberg et al (2007), destacaram que durante eventos de alta energia o transporte de sedimentos ocorre paralelo à costa motivado pela intensificação da deriva litorânea associado ao aumento da energia das ondas.

Angulo et al (2018), apontaram que observações nas orientações das fozes de rios e córregos nas praias permitem inferir que o predomínio de ondas de sul e sudeste gera deriva litorânea líquida sentido norte.

O direcionamento da deriva litorâneas, associado a intensa urbanização do litoral de Matinhos, provocou um desequilíbrio entre o aporte e a saída de sedimentos, ocasionando um recuo da linha de costa em diversas praias de Matinhos-PR (STELLFELD, 2019) e um avanço em Pontal do Sul-PR (ANGULO, 2000).

Este comportamento na dinâmica das praias pode estar associado aos seguintes fatores: variabilidade das costas de desembocadura, retenção de areia da deriva litorânea causada por obras de contenção ao sul da área de estudo (ANGULO, et al., 2018) e modificações antrópicas devido à ocupação intensa da orla (NOVAK, LAMOUR, & CATTANI, 2016).

Figura 1 - Localização do Município de Matinhos-PR



Fonte: O Autor.

Desta forma, as obras de implementação do alargamento artificial da faixa de areia e das estruturas marítimas, buscaram reverter a situação local de desequilíbrio de sedimentos que formaram o quadro progressivo de erosão ao qual a orla esteve sujeita nas últimas décadas, criando um novo cenário para estudos. Ao longo da implantação do novo arranjo estrutural na costa de Matinhos (Figura 2), o órgão ambiental do Estado do Paraná, o Instituto Água e Terra, promoveu um Programa de Monitoramento do Volume Praial que acompanhou a dinâmica do material de preenchimento artificial da faixa de areia entre junho de 2022 e dezembro de 2024 em campanhas bimestrais. Ao final, o estudo indicou estabilidade do volume sedimentar engordado e eficiência das estruturas rígidas na retenção de sedimentos dentro do período observado (Instituto Água e Terra, 2024).

Figura 2: Arranjo das estruturas marítimas na Orla de Matinhos



Fonte: Adaptado de Aquamodelo (2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Levantamentos topobatimétricos

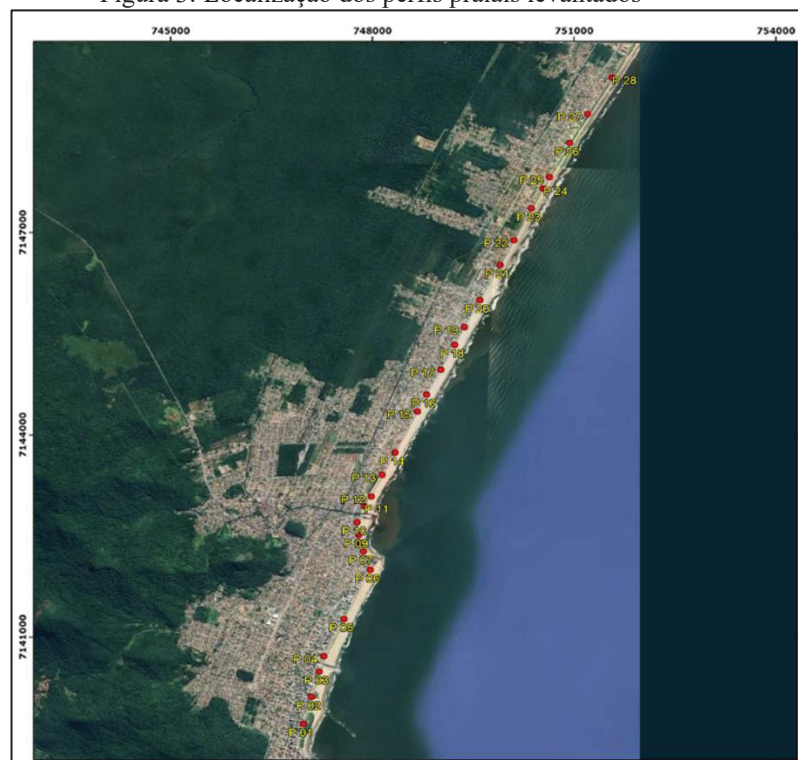
Parte dos dados topográficos foram obtidos entre os meses de junho e outubro de 2018 até a isóbata de 10 metros, durante a baixa-mar em regimes de maré de sizígia, a partir de três receptores GNSS Leica Viva GS15 em modo RTK (Real-Time Kinematic) como parte dos estudos conduzidos por Moreira (2019). Dois receptores foram utilizados como estações móveis e o terceiro operou como base sobre o nível de referência do IBGE localizado dentro do Hotel SESC Caiobá – Matinhos/PR. Para a batimetria, associado a estação móvel, foi utilizado ecobatímetro modelo Garmin echoMAP CHIRP 42dv em uma embarcação durante o mês de abril de 2018 (MOREIRA, 2019). As altitudes geométricas dos dados foram inicialmente registradas no sistema de coordenadas WGS84

e posteriormente convertidas para altitudes ortométricas, utilizando as altitudes geoidais derivadas do modelo geoidal MAPGEO 2010 (IBGE, 2018).

O restante da batimetria foi obtido através da digitalização de cartas náuticas cedidas pelo Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento do Centro de Estudos do Mar (CEM) da Universidade Federal do Paraná.

Para considerar as alterações morfológicas pós engordamento, utilizou-se o módulo QUICKIN do Delft3D para a edição e interpolação de dados dentro da grade computacional. Para tanto, foi realizada triangulação com interpolações lineares a partir de 28 perfis transversais levantados ao longo do litoral de Matinhos em outubro de 2022 (Figura 3), dentro do Programa de Monitoramento do Volume Praial promovido pelo Instituto Água e Terra (2024), durante e após o encerramento dos serviços de engorda.

Figura 3: Localização dos perfis praias levantados



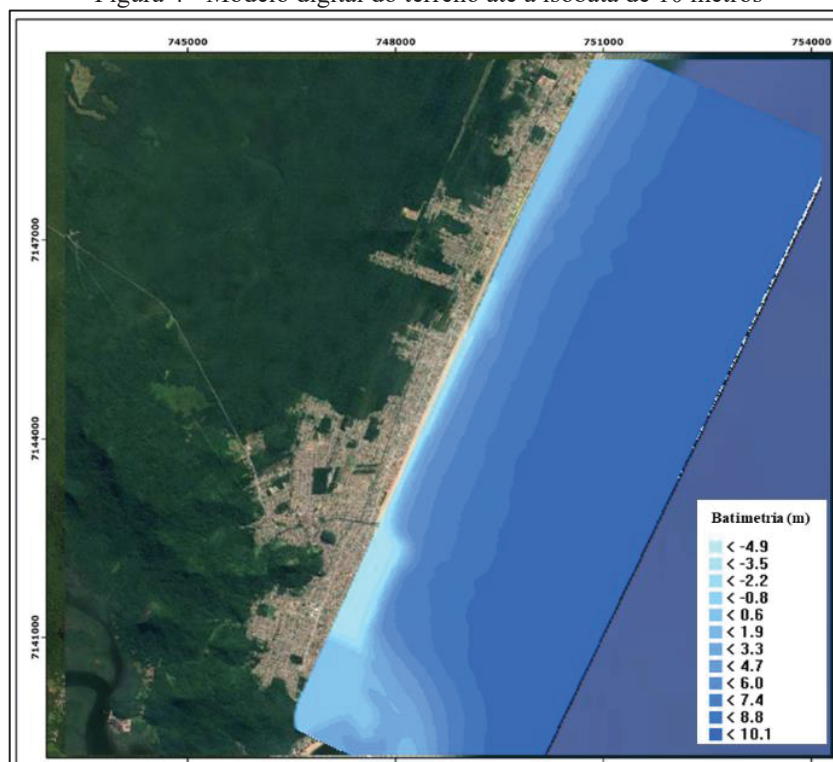
Fonte: Autor. (2025)

Os levantamentos do programa de monitoramento foram realizados a partir de marcos de referência previamente estabelecidos, realizou-se um levantamento

topográfico em perfis perpendiculares à linha de costa, utilizando equipamento DGPS em modo RTK, que permite aquisição de dados em tempo real. Os trabalhos de campo ocorreram novamente durante a maré baixa de sizígia, ampliando a área de coleta na zona emersa. Para o levantamento batimétrico do tipo monofeixe, foi utilizado ecobatímetro modelo ECHOTRAC CVM acoplado a uma embarcação de alumínio de baixo calado com motor de popa, adequada às áreas rasas próximas à costa da Praia de Matinhos. A redução dos dados batimétricos obtidos no levantamento hidrográfico foi feita com base em dados maregráficos da estação da Ponta da Galheta, localizada na entrada da Baía de Paranaguá (PR) a partir de uma análise da defasagem de fase das marés, utilizando como referência duas estações com constantes harmônicas conhecidas: Caiobá e Ponta da Galheta.

A composição dos elementos topobatimétricos elencados acima, originou o modelo digital do terreno (Figura 4) utilizados no modelo.

Figura 4 - Modelo digital do terreno até a isóbata de 10 metros



Fonte: O Autor.

3.2 Modelagem numérica computacional

O modelo computacional e as simulações do transporte de sedimentos na região em análise foram conduzidos utilizando o software Delft 3D para modelagem numérica bidimensional hidrodinâmica e morfodinâmica, associada ao modelo de ondas SWAN (BOOIJ & HOLTHUIJSEN, 1999).

Para tanto, o modelo SWAN foi implementado no módulo Delft 3D-WAVE, que se baseia em esquemas de propagação implícita numericamente estáveis e independentes dos valores de Δt , Δx e Δy para solucionar equações relacionadas às ações de balanço de energia das ondas, às interações não lineares entre ondas, à geração de ondas por vento e à dissipação de ondas. Para modelos que utilizam coordenadas cartesianas, o espaço geográfico é discretizado com uma grade retangular com resolução constante Δx e Δy nas direções x e y , sendo o passo de tempo Δt igualmente constante para as integrações dos termos de propagação e fonte de ondas (HOLTHUIJSEN, 2007).

Para o modelo hidrodinâmico, o módulo Delft3D-FLOW utiliza o método de diferenças finitas para a solução da equação de Navier-Stokes considerando águas rasas e fluido incompressível, além de assumir as hipóteses de Boussinesq de constância nas propriedades do fluido. Uma vez que as acelerações verticais são negligenciadas, os cálculos se resumem na solução da porção hidrostática da equação, sendo as velocidades verticais calculadas por meio da equação de continuidade. No eixo horizontal, o programa usa dois sistemas de coordenadas curvilíneas ortogonais para auxiliar na redução de erros de discretização nos contornos, pois em ambiente estuarino e costeiro as fronteiras geralmente são irregulares (DELTARES, 2024).

Para o transporte de sedimentos não coesivos, o modelo considera a abordagem de Van Rijn et al. (2001), na qual a dinâmica das partículas é parametrizada pela introdução

de uma fórmula para o transporte integrado à profundidade devido a correntes e ondas, a partir das seguintes formulações:

$$q_{tot} = q_b + q_s$$

Onde:

q_{tot} : taxa de transporte

q_b : carga de fundo

q_s : carga em suspensão

As cargas de fundo são calculadas a partir da seguinte equação:

$$q_b = \gamma \rho_s d_{50} D^{*-0.3} \left[\left[\tau_{b,cw} / \rho \right]^{0.5} \left[\tau_{b,cw} - \tau_{b,cr} \right] / \tau_{b,cr} \right]^\eta$$

Onde:

$\tau_{b,cw}$: tensão instantânea de fundo relacionada aos grãos devido a correntes e ondas

$\tau_{b,cr}$: tensão crítica de fundo conforme Shields

ρ_s : densidade do fluido

d_{50} : tamanho da partícula

D^* : tamanho da partícula adimensional

γ : coeficiente

η : expoente

O transporte de sedimentos em suspensão é definido como a soma dos transportes relacionados à corrente líquida ($q_{s,c}$) e às ondas ($q_{s,w}$) a partir de valores médios de velocidade e concentração do topo do leito arenoso até a superfície de água.

$$q_s = q_{s,c} + q_{s,w} = \int v c \, dz + \int \langle (V - v)(C - c) \rangle \, dz$$

Onde:

$q_{s,c}$: taxa de transporte média de sedimento relacionada às correntes

$q_{s,w}$: taxa de transporte média de sedimentos relacionada às ondas

v : velocidade média

V : vetor de velocidade instantânea

C : concentração instantânea

c : concentração média

Deste modo, o fluxo das partículas de areia é calculado como a soma do transporte da carga de fundo e do fluxo da carga em suspensão, considerando efeitos de turbulência no perfil de velocidades (Benoît & Larroudé, 2020).

3.3 Configuração do modelo numérico computacional

O domínio de simulação do modelo hidrodinâmico é composto por uma malha retangular em sistema de coordenadas cartesiano, com 500 células no sentido longitudinal de resolução uniforme de 30 metros. No sentido transversal à praia, a malha possui 90 células com resolução variando de 25 metros nas regiões próximas a linha de costa e 70 metros em direção ao mar aberto, até a isóbata de 10 metros de profundidade.

Os processos hidrodinâmicos utilizados no contorno leste da grade desenvolvida foram obtidos através de resultados de um modelo hidrodinâmico desenvolvido pelo SIMEPAR a partir de uma grade com resolução espacial de 150 metros. O modelo assimila resultados do modelo global desenvolvido pelo Copernicus Marine System (CMENS), o que permite considerar o efeito das marés astronômicas e meteorológicas na

costa do Paraná, além de considerar o efeito do vento em toda a extensão da grade numérica, gerando uma previsão de correntes ao longo de 30 km em direção ao mar aberto delimitada ao norte pela Praia de Leste e ao sul pela Barra do Saí/SC (SIMEPAR, 2023). Os dados de vento inseridos no modelo foram obtidos a partir de valores disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o mesmo período de simulação.

A entrada no contorno foi realizada através de uma série temporal de níveis de água. O modelo também foi forçado com parâmetros horários de onda (altura significativa, período, direção e espalhamento direcional) obtidos pelo modelo SWAN (Seção 3.5). Nos extremos abertos norte e sul da grade, foram inseridas condições de contorno do tipo Neumann, impondo um gradiente constante de elevações de água.

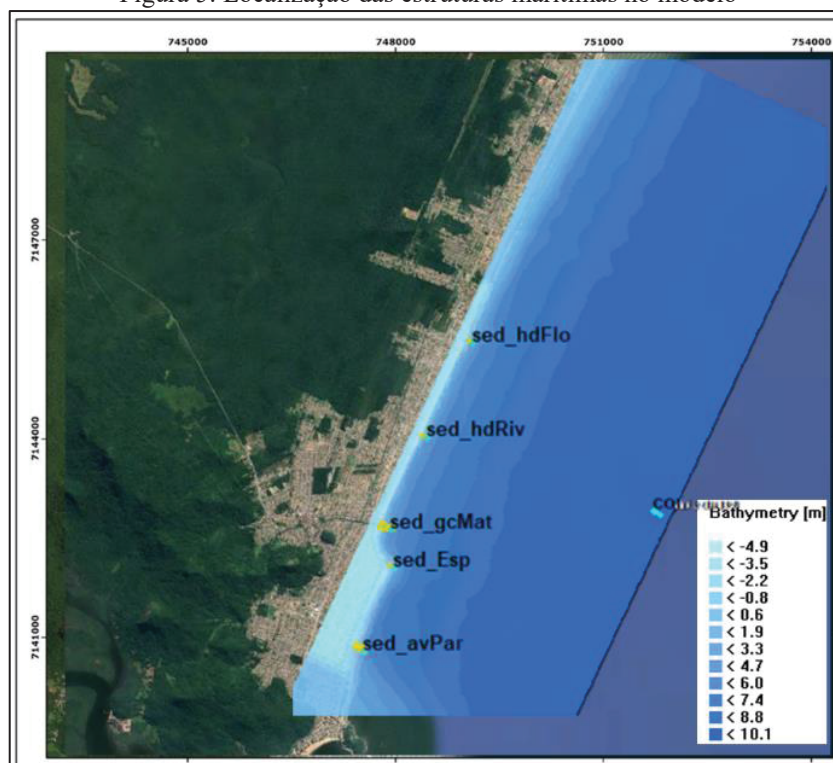
Para considerar os efeitos de turbulência e dissipação, foi utilizado o modelo de fechamento $k-\epsilon$ com a configuração padrão do Delft3D-FLOW e viscosidade horizontal de $1 \text{ m}^2/\text{s}$.

A validação das elevações de água ocorreu através da comparação com dados do marégrafo SIMCosta da baía de Guaratuba ($25^{\circ}51'25'' \text{ S}$, $48^{\circ}34'01'' \text{ W}$), representando a maré astronômica e meteorológica para o mesmo período de simulação.

3.4 Inserção das estruturas marítimas

As estruturas que promovem a retenção de sedimentos foram inseridas dentro do modelo hidrodinâmico como um barramento para o fluxo hidráulico e como obstáculos no modelo de ondas, utilizando as coordenadas de alinhamento (Figura 5) dos dispositivos marítimos apresentadas na especificação técnica do projeto (IAT; [Recuperação da Orla de Matinhos | Instituto Água e Terra](#)). Para tanto, inseriu-se as estruturas a partir de segmentos de reta e com suas alturas de cabeço em relação ao nível de referência, desconsiderando efeitos de reflexão.

Figura 5: Localização das estruturas marítimas no modelo

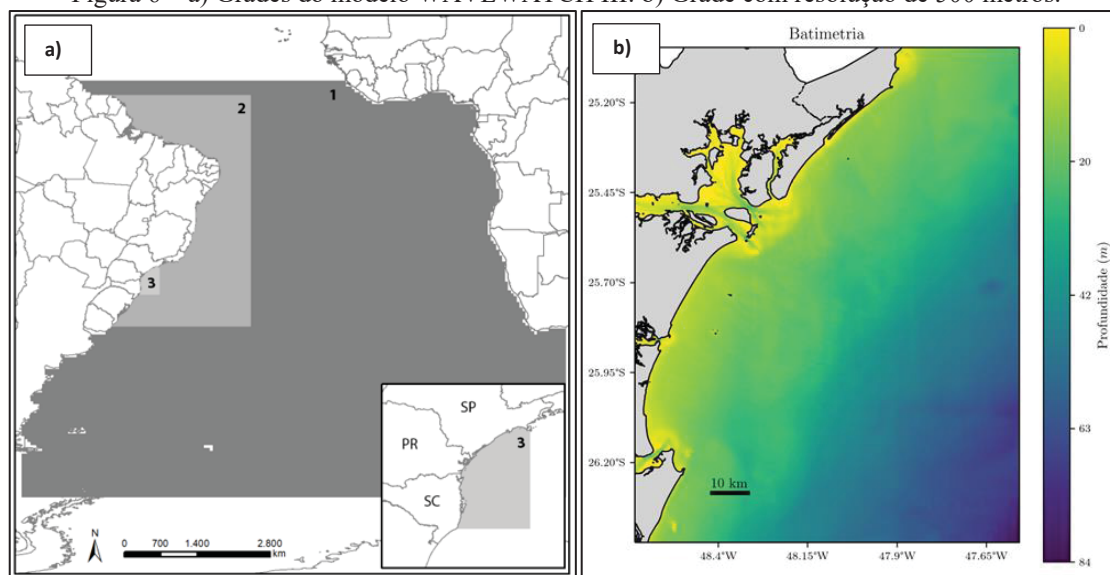


Fonte: O Autor.

3.5 O modelo de ondas e de acoplamento

De modo a fornecer as condições de contorno para a grade do SWAN implementada neste trabalho, foi utilizado o modelo operacional, em funcionamento desde março de 2023 pelo SIMEPAR, proposto por Moreira (2019) e modificado por Oliveira (2022). Esse modelo consiste no aninhamento de 3 grades do modelo WAVEWATCH III (Figura 6a) e uma grade intermediária com 500 metros de resolução – implementada por Moreira (2019) para considerar os efeitos de ondas em escala local – compreendendo o litoral norte de Santa Catarina até a divisa entre Paraná e São Paulo (Figura 6b).

Figura 6 – a) Grades do modelo WAVEWATCH III. b) Grade com resolução de 500 metros.



Fonte: OLIVEIRA, D. M. (2022)

Adotando uma resolução temporal de 10 minutos, foram geradas séries temporais inseridas no modelo SWAN a partir de 12 pontos posicionados no contorno da grade (Figura 7), cujas características estatísticas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Características estatísticas das séries históricas de ondas.

	Intervalo de valores	Valor Médio	Desvio Padrão
Altura Significativa (H_s)	0,437 m – 1,64 m	0,89 m	0,24
Período (T)	2,7 s – 12,66 s	5,93 s	1,50 s
Direção (α)	77,22° – 165°	118,34°	20,89°

De acordo com Jones et al (2007), na modelagem acoplada entre ondas e correntes, os efeitos do conjunto de ondas e dos gradientes de movimento são incorporados por meio das tensões de radiação, gerando um campo tensorial que é então integrado ao modelo acoplado hidrodinâmico e de transporte de sedimentos, onde os gradientes das tensões de radiação atuam como forçantes de fluxos de massa e movimento, gerando correntes induzidas por ondas e transporte longitudinal (ao longo da costa).

Os resultados do modelo foram comparados com as observações registradas pela boia SiMCOStA PR-1, localizada na cidade de Pontal do Paraná ($25^{\circ}39,77'$ S, $48^{\circ}19,46'$ W).

Figura 7: Pontos de inserção do espectro de ondas no contorno

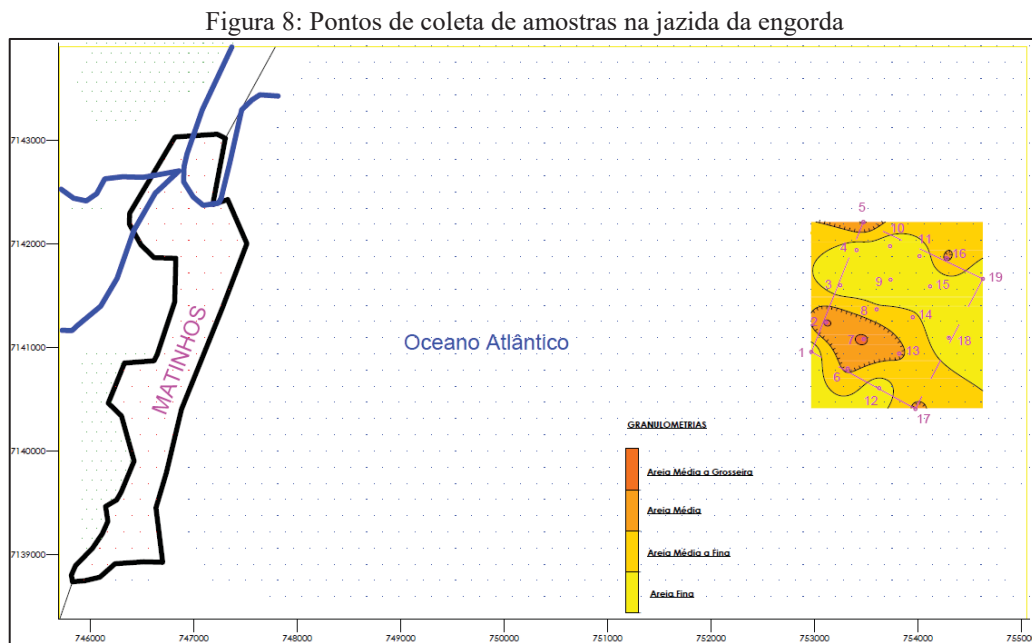


Fonte: Autor (2025)

Com o intuito de gerar uma simulação que descreva de maneira adequada a interação dinâmica entre marés e ondas, fez-se necessário o acoplamento entre os diferentes modelos gerados. Para realizar esta interação entre o modelo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW) e o modelo de ondas (Delft3D-WAVE) as grades numéricas de ambos os modelos são acopladas para que sejam calculadas as médias da equação da continuidade e da quantidade de movimento durante o período da onda (DELTARES, 2024). A comunicação entre os modelos ocorre através de um arquivo que contém os resultados mais recentes dos cálculos do modelo FLOW (velocidades das correntes e níveis de água) e do modelo WAVE (tensões de radiação, pressões de indução das ondas e energia de dissipação de ondas).

3.6 Parâmetros sedimentológicos

As características dos sedimentos do leito oceânico foram obtidas através do relatório publicado pelo Instituto Água e Terra (IAT; [Recuperação da Orla de Matinhos | Instituto Água e Terra](#)) a partir do levantamento de 19 pontos realizado na jazida da qual a areia do alargamento praias foi retirada. Os trabalhos de campo foram realizados à 6 km de distância da costa (Figura 8) entre 10 e 24/04/2020 com apoio de uma embarcação, ecobatímetro e de uma draga de arrasto Gibbs (ÁGUA E MINÉRIO, 2020). Deste modo, a partir dos valores de diâmetro médio (D50) característico do leito oceânico na região da jazida obtidos através de ensaios granulométricos, foram consideradas em todo o domínio do modelo 3 frações de sedimentos com os diâmetros característicos de 100 μm (média das frações finas), 400 μm (média das frações intermediárias) e 1300 μm (média das frações grossas).



Fonte: Instituto Água e Terra (2020)

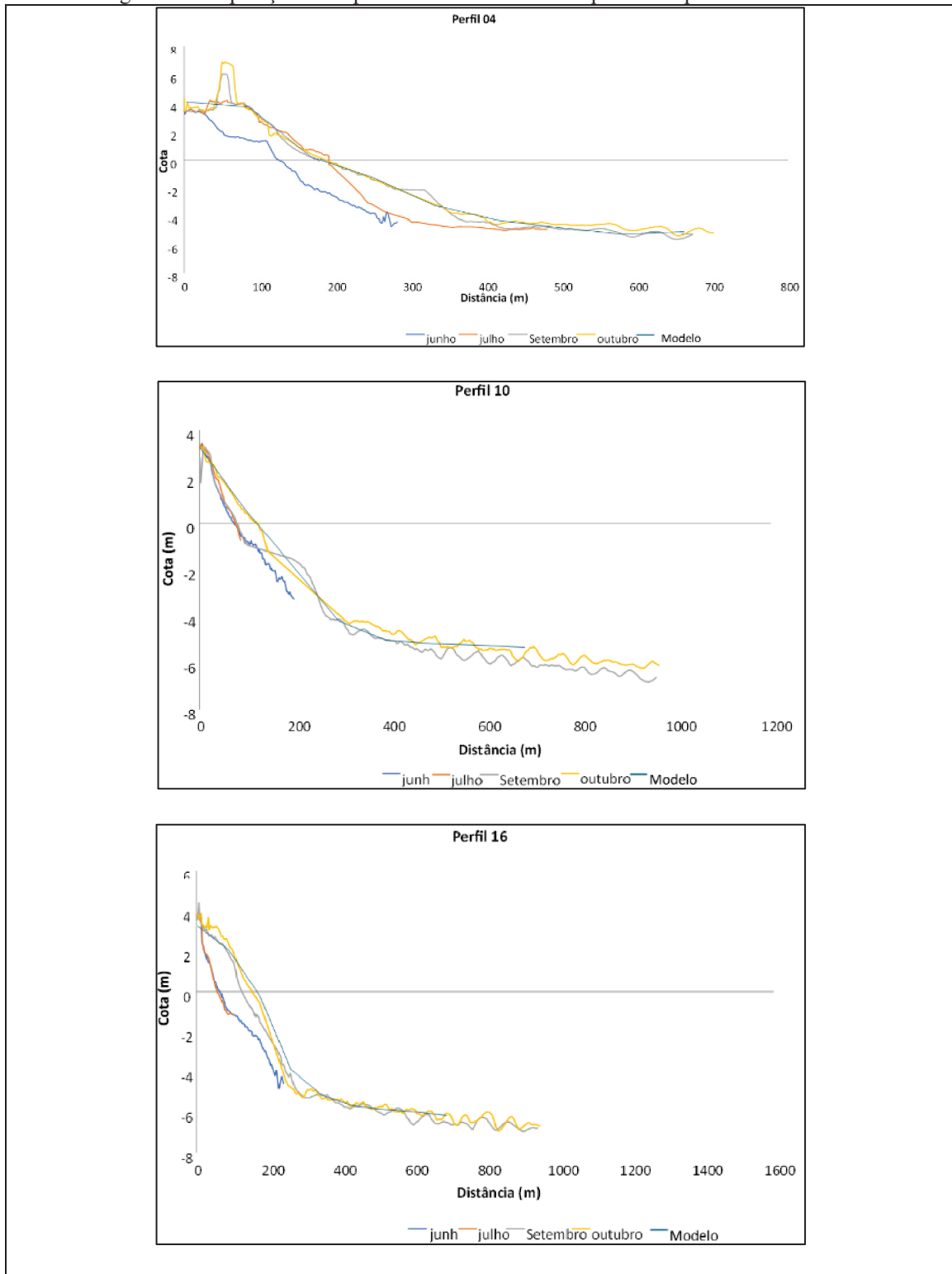
4. RESULTADOS

4.1 Morfologia da área de estudo

As alterações morfológicas promovidas na orla a partir do engordamento foram representadas no modelo a partir da conformação observada em outubro de 2022. A Figura 9 apresenta o perfil interpolado na geração do modelo digital do terreno (MDT) em comparação com os perfis 4, 10 e 16.

O Perfil 4 está localizado à sotamar do Guia de Correntes norte da Av. Paraná e teve sua alimentação artificial de areia concluída no mês de julho de 2022. Neste perfil, o acompanhamento do volume praiar demonstrou sua possível manutenção entre os meses de setembro e outubro de 2022. Após o Pico de Matinhos, à barlamar do Guia de Correntes sul do Rio Matinhos, está localizado o Perfil 10, cujo encerramento dos serviços de engorda ocorreu no mês de setembro de 2022. O Perfil 16 está localizado à sotamar do Headland Riviera, onde pode ser observado um aumento no volume de sedimentos entre os meses de setembro e outubro, possivelmente causado pelo transporte de sedimentos no sentido norte da deriva litorânea.

Figura 9: Comparação entre perfis de levantamento e o perfil interpolado no modelo



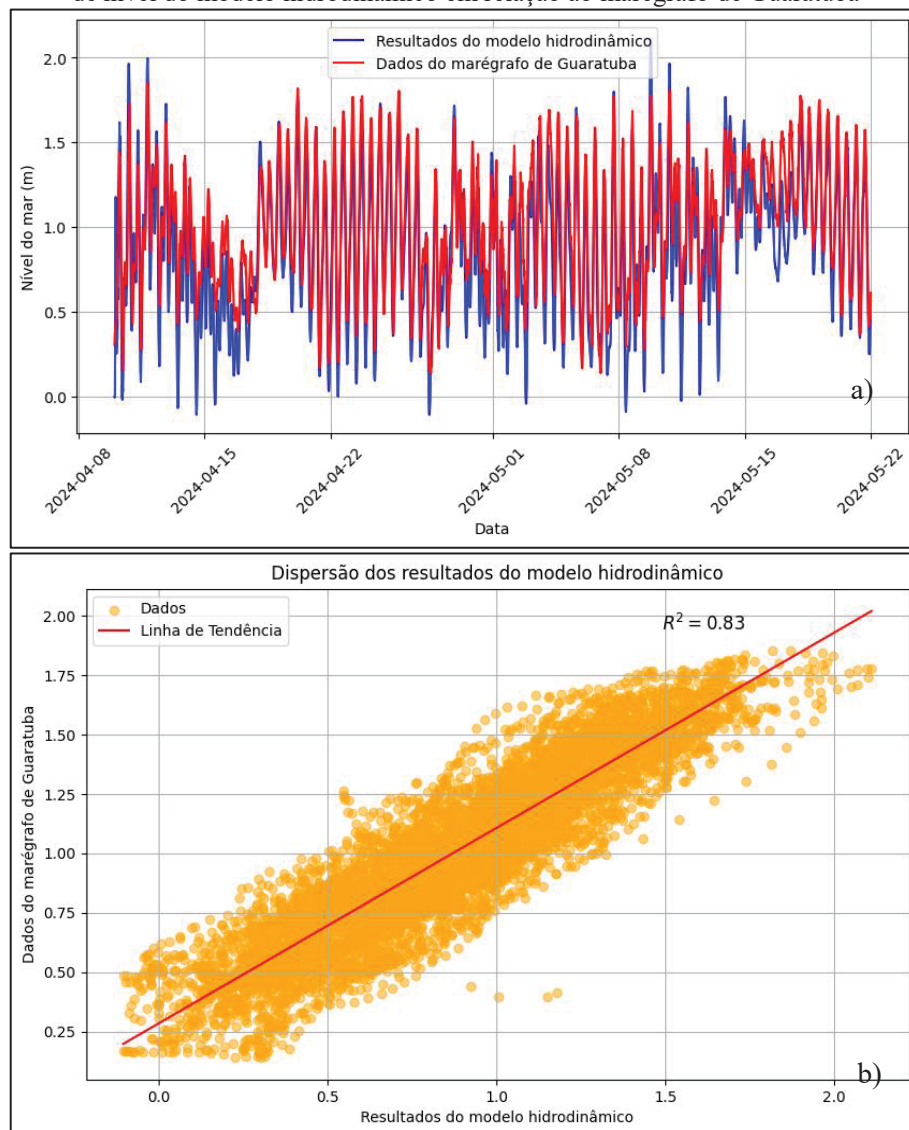
Fonte: O Autor.

4.2 Níveis de água e alturas de ondas

O modelo foi testado para o período de 10/04/2024 a 22/05/2024 com resolução temporal de 12 segundos e seus resultados foram comparados aos dados do Marégrafo

SIMCosta instalado na Baía de Guaratuba e da boia SIMCosta PR-1 localizada em Pontal do Paraná, ambas em regiões fora do domínio do modelo (aproximadamente 7 km e 30 km, respectivamente), mas com dados disponíveis para avaliação. A comparação entre os dados de nível de água inseridos no contorno do modelo e os dados do marégrafo apresentaram R^2 de 0,83 (Figura 10).

Figura 10: a) Resultado da comparação do modelo hidrodinâmico Delft3D. b) Dispersão entre os dados de nível do modelo hidrodinâmico em relação ao marégrafo de Guaratuba

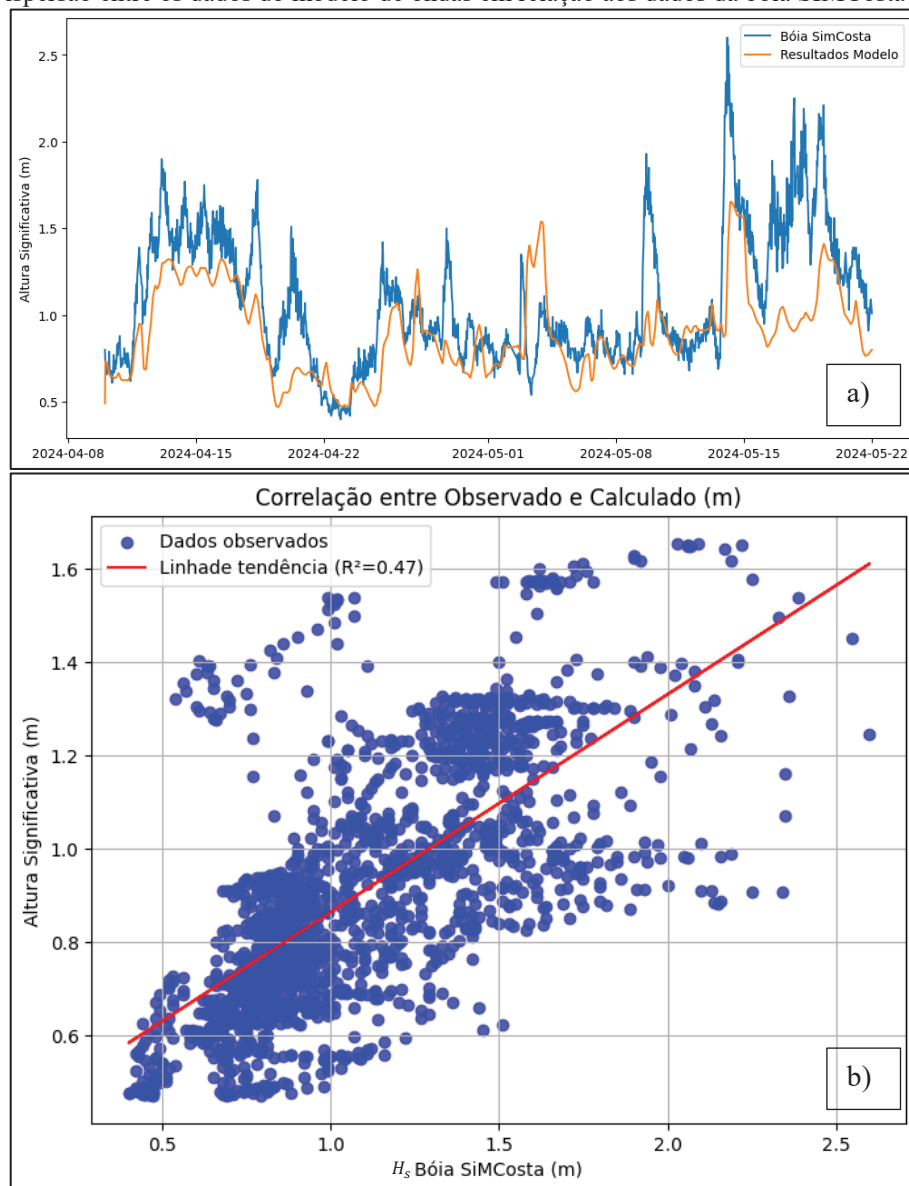


Fonte: O Autor.

Os resultados do modelo gerador e propagador de ondas SWAN foram comparados com os dados da boia SIMCosta PR-1 considerando suas alturas significativas (H_s), utilizando-se como medida de ajuste do modelo o coeficiente R^2 (Figura 11). Observa-se

que o modelo obteve diferenças mais acentuadas na representação dos picos superiores a 1,5 metros registrados pela boia, fato que pode estar relacionado com a diferença de localização entre a boia e o ponto de observação do modelo, associado a uma tendência sugerida por Mortlock et al (2014) e Lemcke et al (2017) de subestimação dos resultados modelo SWAN quando comparados com dados observados.

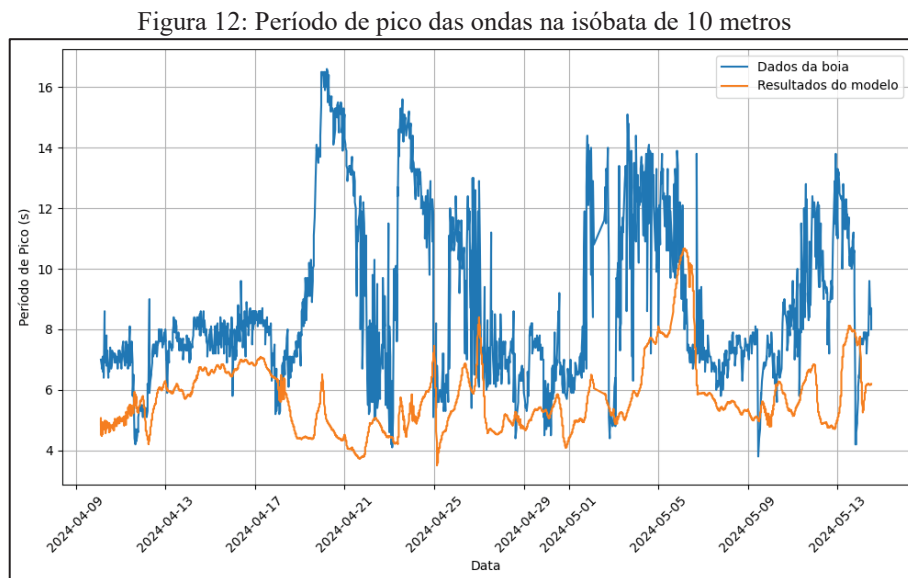
Figura 11: a) Ajuste entre o modelo de ondas e os dados da boia SIMCosta PR-1 para o período simulado.
b) Dispersão entre os dados do modelo de ondas em relação aos dados da boia SIMCosta PR-1.



Fonte: O Autor.

Tais resultados permitem sinalizar que no período simulado as condições da energia das ondas foram moderadas, predominando alturas significativas inferiores a 1,5 metros

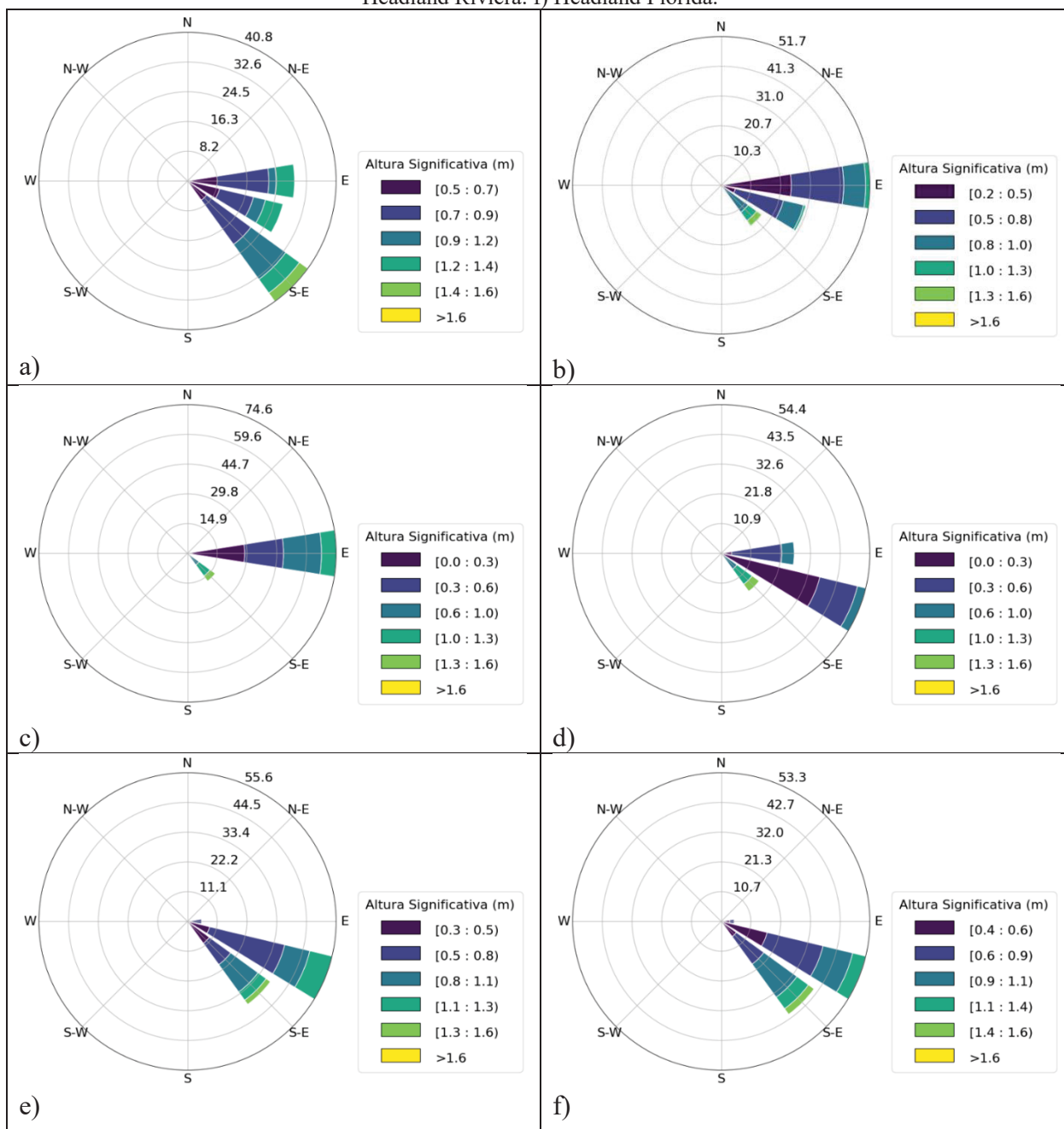
e períodos prevaletentes entre 4 e 8 segundos (Figura 12), próximos aos obtidos por Luersen et al (2024).



Fonte: O Autor.

Os histogramas direcionais de altura significativa de onda (Figura 13) no contorno do modelo e próximo às estruturas marítimas indicam uma tendência de refração das ondas ao se aproximar da zona de arrebentação (Figura 13b e Figura 13c), fenômeno também observado por Gobbi (1997) e Moreira (2019) em seus estudos. Nota-se, em especial, a demonstração de uma possível influência da zona de sombra do Morro do Boi e do Pico de Matinhos no direcionamento do trem de ondas nas proximidades do Guia de Correntes da Av. Paraná e do Espigão da praia Brava.

Figura 13: Histogramas direcionais das alturas significativas de ondas em a) Contorno do modelo. b) Guia de correntes da Av. Paraná. c) Espigão da Praia Brava. d) Guia de correntes do Rio Matinhos. e) Headland Riviera. f) Headland Florida.



Fonte: O Autor.

4.3 Processos hidrodinâmicos e dinâmica dos sedimentos

As correntes geradas pelo modelo foram comparadas com valores observados por Noernberg e Rodrido (2024), que fundearam um medidor ADCP em Matinhos no período de 07/04/2022 a 28/04/2022 em uma profundidade de 18 metros e a aproximadamente 8 km da região contemplada pela grade numérica deste estudo. Os resultados da

comparação entre os dados gerados no modelo com os dados observados por Noernberg e Rodrido, para o mesmo intervalo de tempo, são apresentados abaixo.

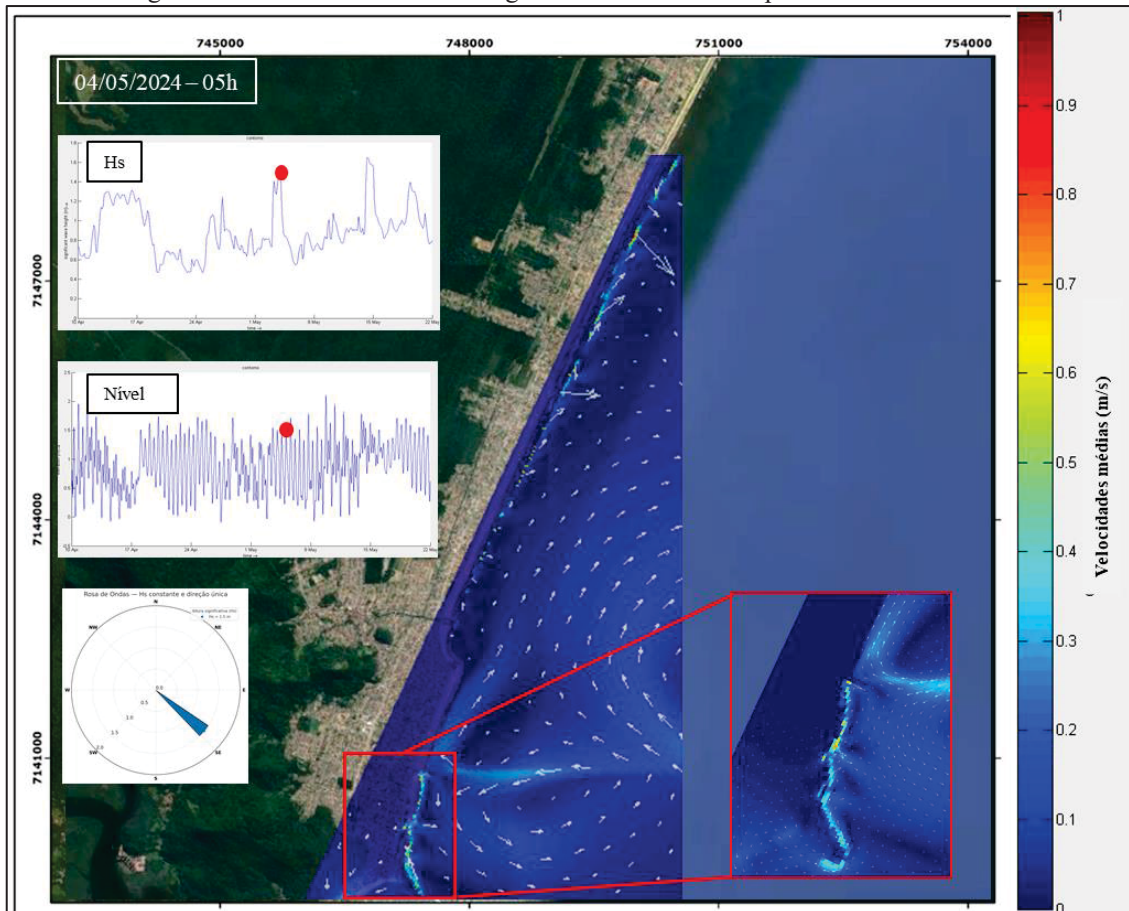
Tabela 2: Resultados da comparação entre os dados do modelo e os observados pelo ADCP.

	Média do Modelo	Média Observada	RMSE
Altura Significativa (H_s)	0,86 m	0,90 m	0,30 m
Período (T)	5,36	9,6 s	4,82 s
Direção (α)	110,7°	115°	84,09°

Além das distâncias entre os pontos de observação e o ponto onde foram obtidos os valores do modelo, os valores comparados estão em isóbatas com 8 metros de diferença, o que pode explicar os valores da Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE), especialmente em decorrência dos efeitos de refração causados pelo Morro do Boi e Pico de Matinhos e da maré vazante da Baía de Guaratuba experimentados pela região onde a modelagem foi aplicada.

Para o intervalo de tempo simulado, destacam-se alguns eventos. O evento abaixo (Figura 14) ocorreu para uma altura significativa de onda no contorno de aproximadamente 1,5 metros de altura e ondas com direção de 130° (SE).

Figura 14: Vetores de velocidade e gradiente de velocidade para o evento simulado

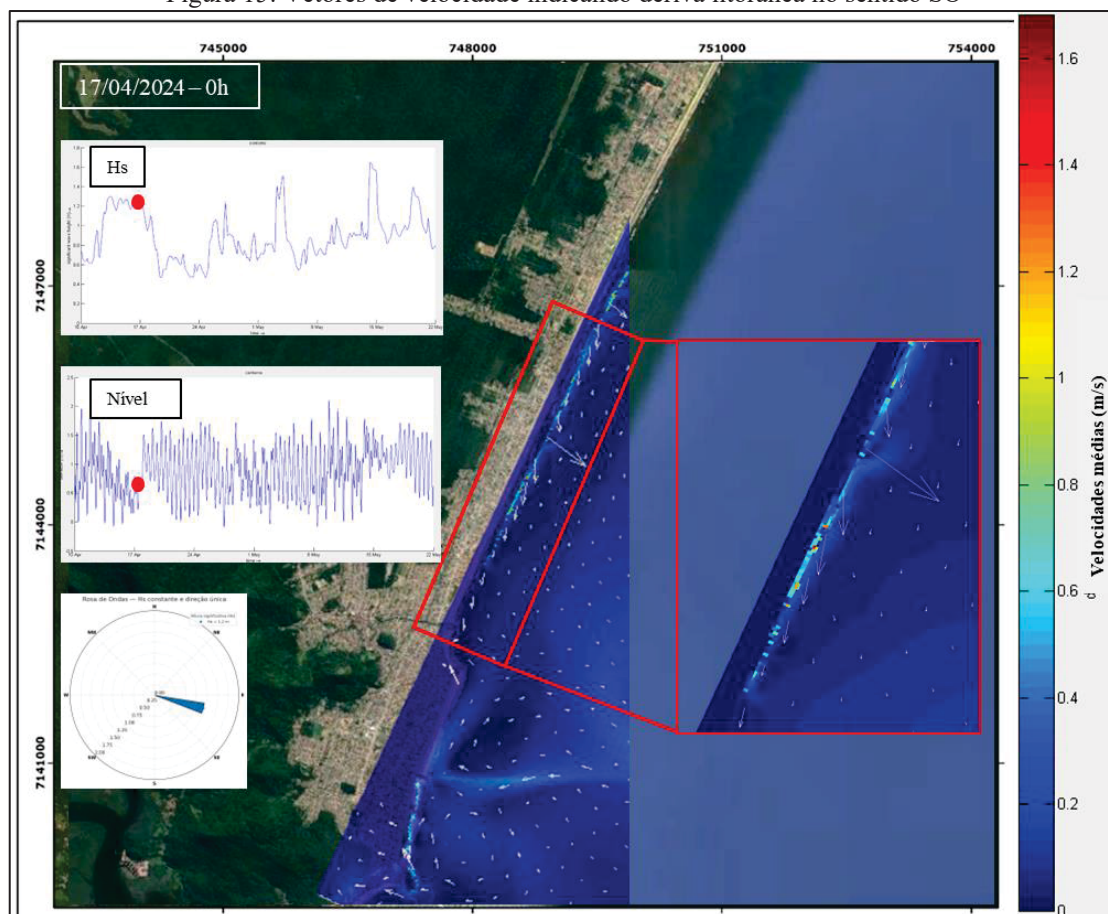


Fonte: O Autor.

O campo médio de velocidades para este evento foi de 0,5 m/s e é possível notar os vetores próximos a linha de costa representado correntes de retorno de maior intensidade. Mais ao sul, nas proximidades do Morro do Boi, o campo de velocidades foi mais intenso nas proximidades da praia brava até se encontrar com o guia correntes da Av. Paraná. Também é possível notar a formação da deriva litorânea no sentido NE.

A deriva litorânea apresentou variações de sentido ao longo do período de simulação, conforme pode ser observado na Figura 15, em um evento de maré de baixa-mar com altura significativa de aproximadamente 1,2 metros no contorno do domínio de simulação, com ondas na direção 110° (ESE). O fenômeno de inversão da direção da deriva litorânea também foi observado por Moreira (2019) e Soares (2019).

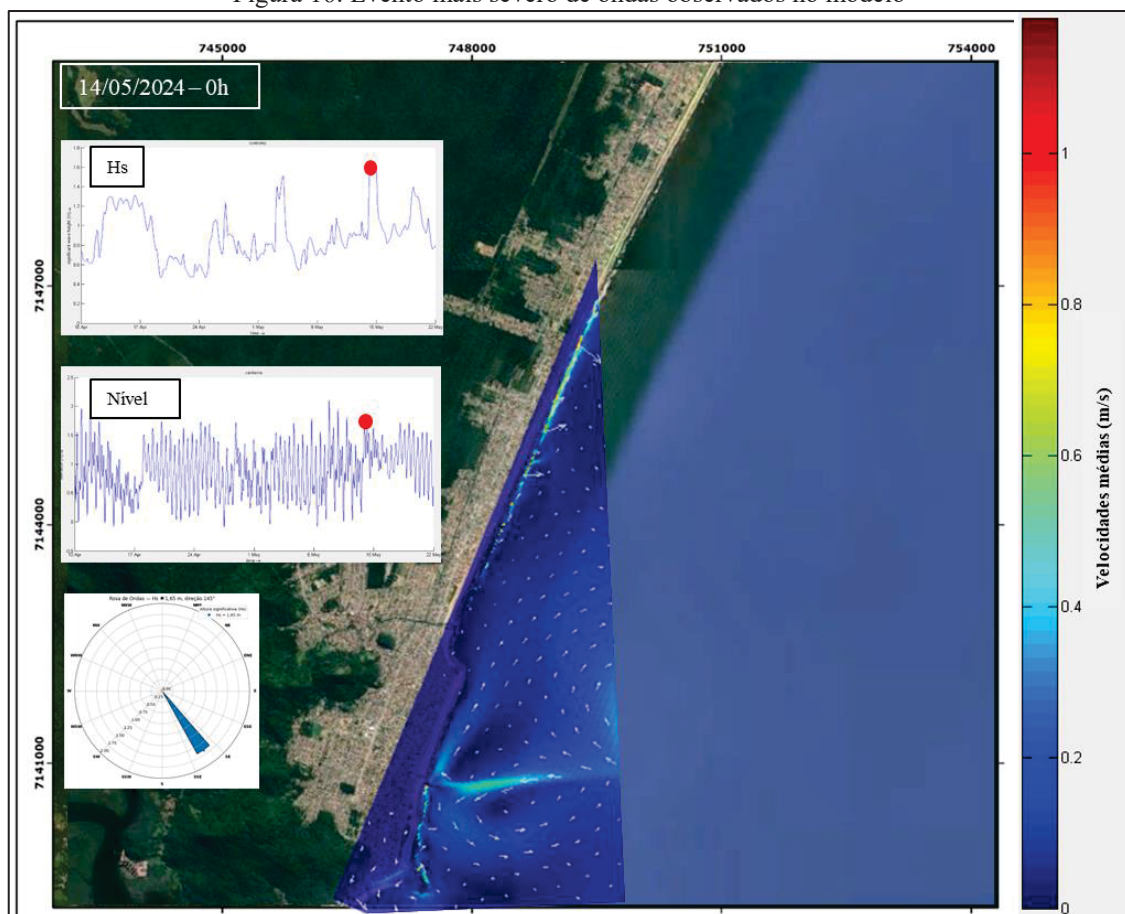
Figura 15: Vetores de velocidade indicando deriva litorânea no sentido SO



Fonte: O Autor.

Eventos mais intensos, como o ocorrido na Figura 16, com altura significativa de onda de 1,65 metros e direção de 145° , geraram correntes mais intensas na região ao norte do Headland Florida, com a deriva orientada predominantemente de sul para norte e correntes com velocidades médias na ordem 0,6 m/s, sendo que na porção mais ao norte as velocidades das correntes chegaram a atingir aproximadamente 1 m/s.

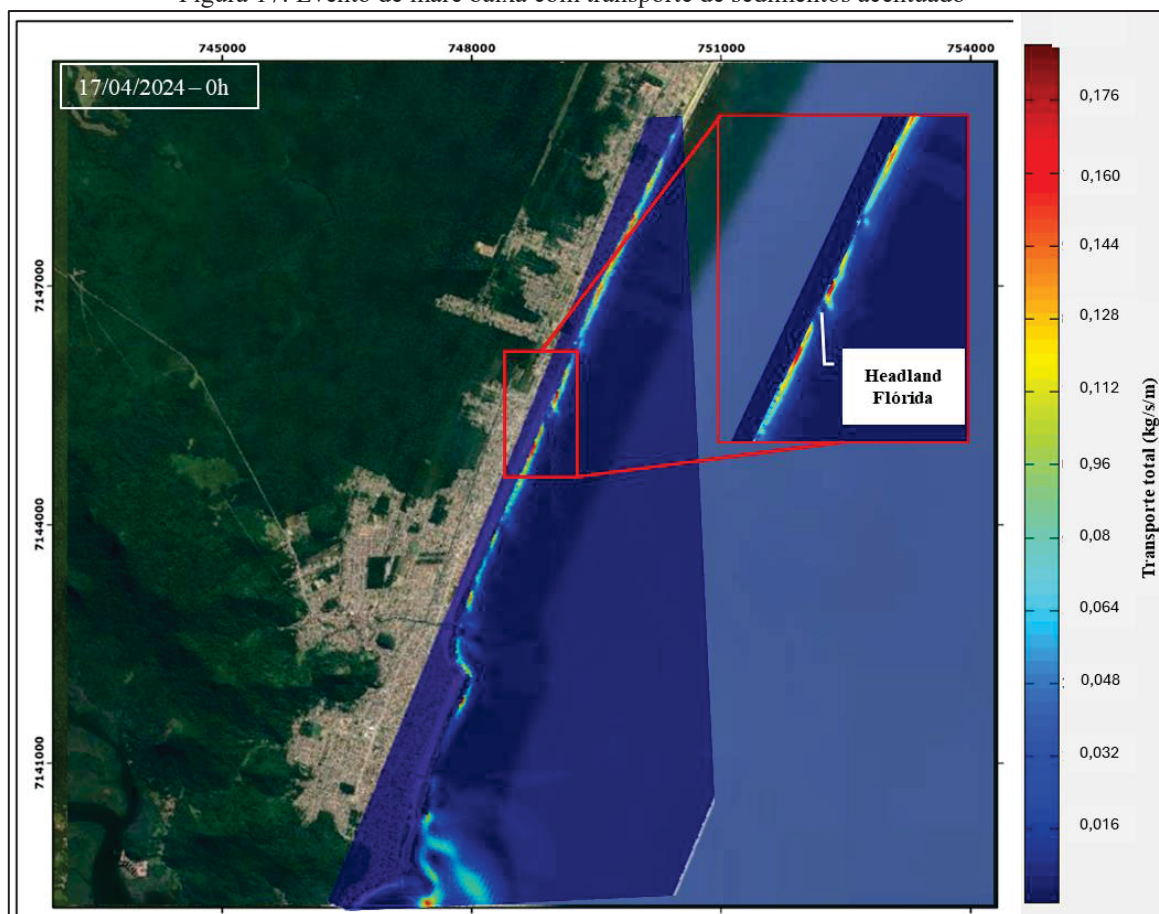
Figura 16: Evento mais severo de ondas observados no modelo



Fonte: O Autor.

Dentre os eventos acima descritos, o de transporte total de sedimentos de maior intensidade foi o evento simulado em 17/04/2024 em período de maré baixa, cujo mapa é apresentado abaixo para as frações mais finas de solo. Nele é possível perceber o efeito da estrutura de Headland no Balneário Flórida com transporte mais intenso na sua porção norte, estando a deriva litorânea no sentido orientada de norte para sul, como visto na Figura 16. Na porção mais ao sul, nas proximidades do Morro do Boi, também é possível perceber um campo mais intenso no transporte sedimentar, região esta sob influência da maré de vazante da Baía de Guaratuba, conforme observado por Gobbi (1997).

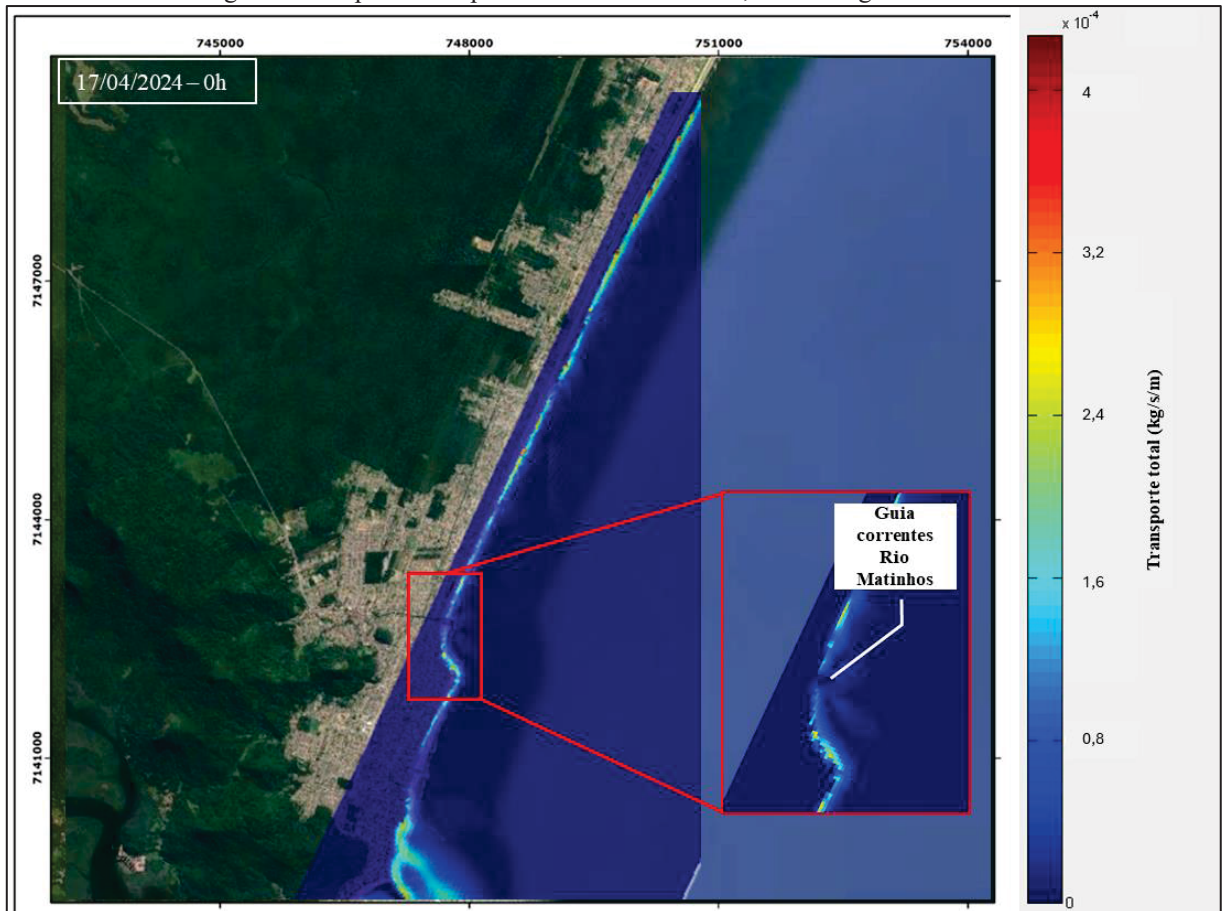
Figura 17: Evento de maré baixa com transporte de sedimentos acentuado



Fonte: O Autor.

Na Figura 18, apresenta-se o mapa de transporte sedimentar com a soma para as 3 frações de sedimentos para o evento acima descrito. Em ambas as imagens (Figura 17 e Figura 18) é possível perceber o efeito de atenuação do gradiente de transporte de sedimentos nas imediações do guia correntes do Rio Matinhos, bem como a formação de campos mais intensos da dinâmica sedimentar nas porções mais ao norte da praia.

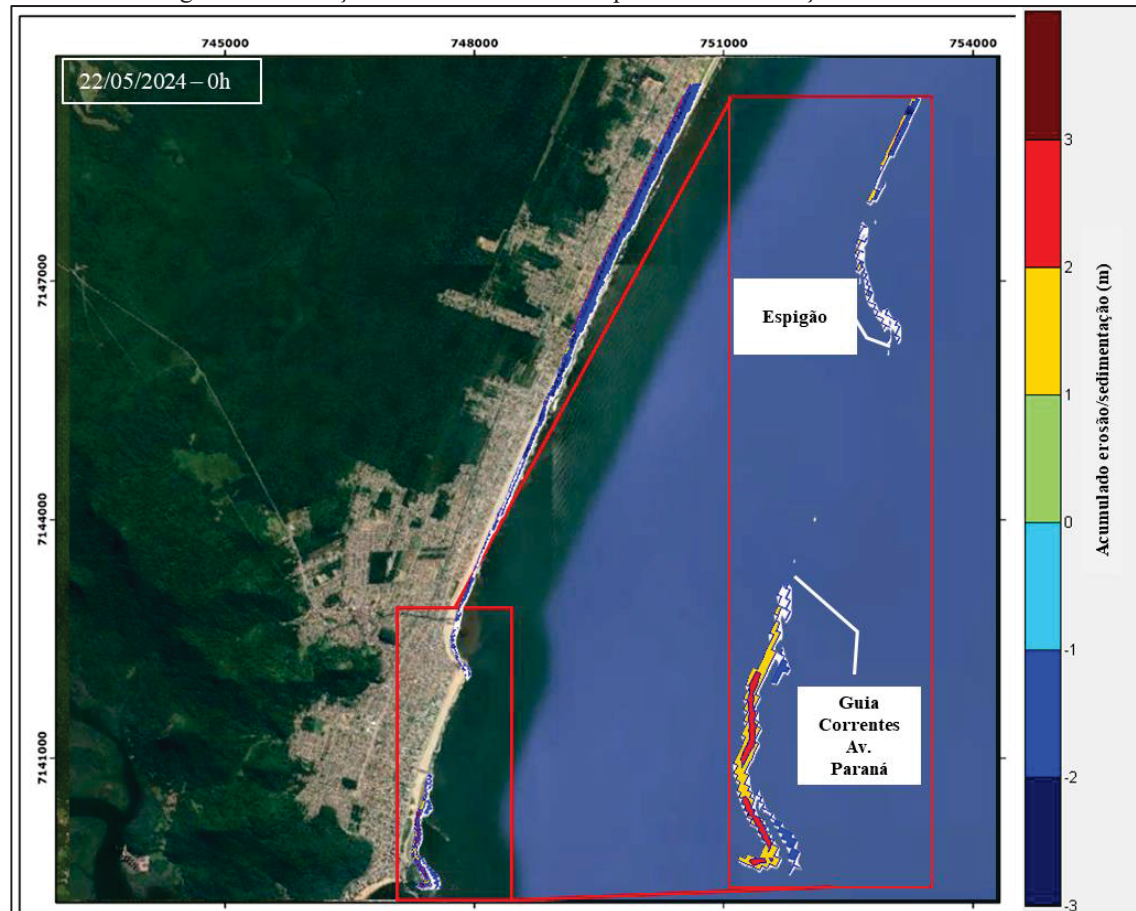
Figura 18: Mapa de transporte de sedimentos finos, médios e grossos



Fonte: O Autor.

O balanço cumulativo entre erosão e deposição de sedimento ao final do período de simulação é apresentado abaixo (Figura 19), com destaque para a região da Praia Brava de Caiobá (entre o Morro do Boi e o guia correntes da Av. Paraná), com balanço tendendo para erosão em partes do trecho, e apresentando presumivelmente uma estabilização entre o guia correntes da Av. Paraná até o Espigão da Praia Brava (proximidades do Pico de Matinhos).

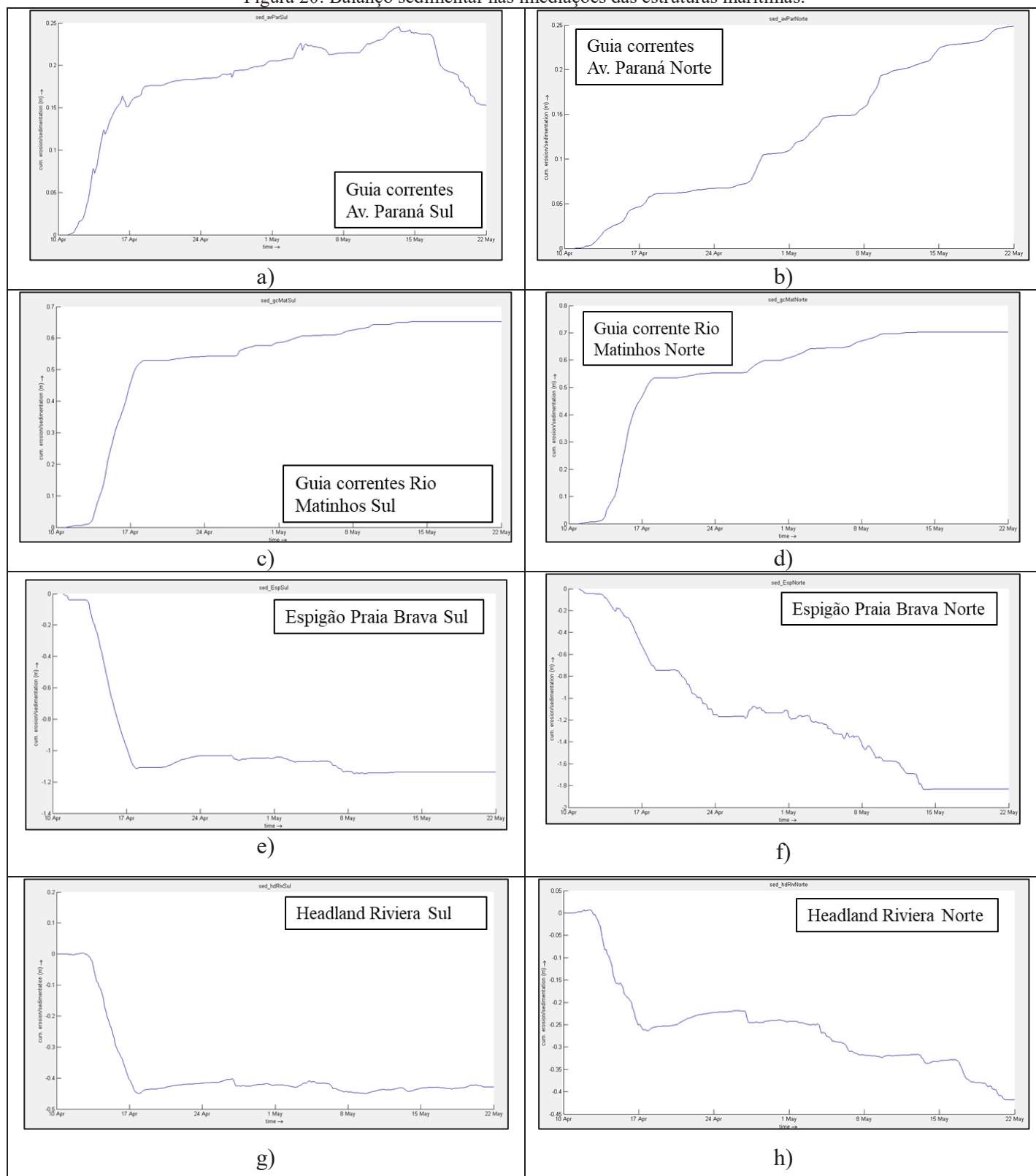
Figura 19: Balanço sedimentar ao final do período de simulação

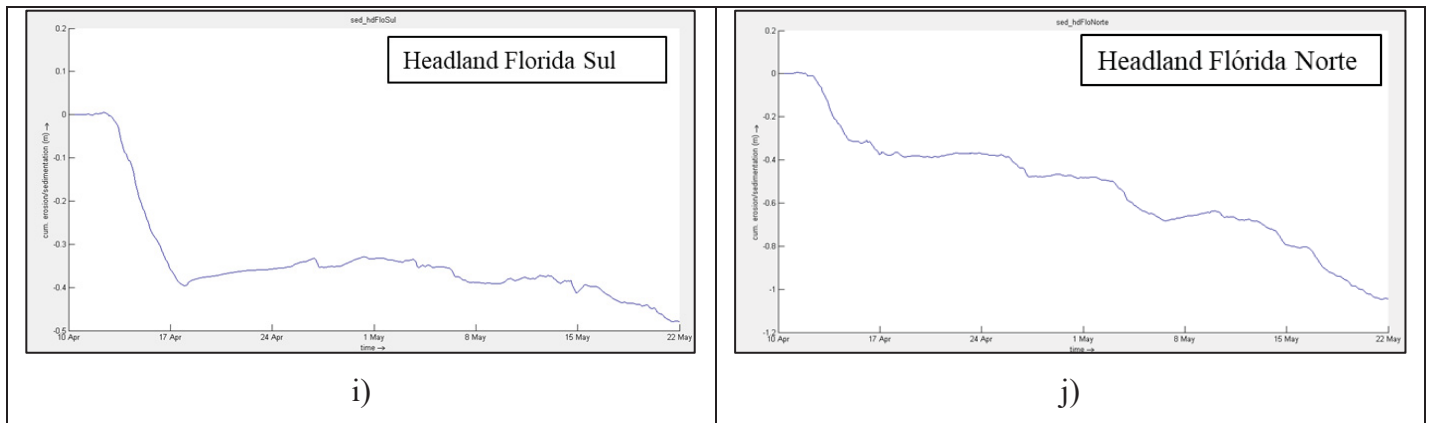


Fonte: O Autor.

Foram posicionados pontos de observação com o objetivo de investigar o balanço sedimentar ligeiramente ao norte e ao sul de cada estrutura marítima (Figura 20). Os gráficos mostram que os guias de correntes da Av. Paraná e do Rio Matinhos acumularam sedimentos em ambas as faces durante o intervalo de simulação, o que pode indicar que um possível efeito de inversão da deriva litorânea ocasione o aporte de sedimentos em ambas as faces das estruturas. O acúmulo de sedimentos nos guias de correntes pode estar relacionado também com o fato de ambas as estruturas serem as mais extensas do sistema de proteção de areia construído. No entanto, o guia corrente sul do canal da Av. Paraná apresentou tendência a erosão ao final do processo de simulação. As demais estruturas apresentaram tendência a erosão dentro do intervalo de modelagem, ocorrendo uma tendência de estabilização do balanço sedimentar nos períodos finais de modelagem.

Figura 20: Balanço sedimentar nas imediações das estruturas marítimas.





Fonte: O Autor.

O balanço sedimentar foi simulado também para a condição de engordamento da faixa de areia sem a implementação das estruturas marítimas para proteção do alargamento da faixa de areia, os resultados podem ser visualizados no APÊNDICE 1. Apesar das incertezas inerentes ao modelo e do curto intervalo de simulação, é possível perceber a tendência predominante de erosão ao longo de toda extensão preenchida por areia dentro do intervalo de simulação.

5. DISCUSSÃO

O período para o qual ocorreram as simulações apresentadas neste trabalho corresponde a estação de Outono, período de transição no qual Nemes e Marone (2013) apontaram a ocorrência de ondas de maior energia, destacando a importância dos equinócios para caracterizar fenômenos de caráter destrutivo sob a ótica das consequências erosivas na costa paranaense.

Dentro do intervalo de simulação, foi possível notar a relevância da deriva litorânea no transporte de sedimentos (Figura 16), corroborando com o histórico de estudos anteriores (GOBBI (1997); ÂNGULO (2000); OLIVEIRA (2022)). Da mesma forma, o modelo também representou as variações direcionais dessas correntes longitudinais identificadas por Luersen et al. (2024).

Pôde-se notar alterações no comportamento hidrodinâmico do modelo em regiões de influência das estruturas marítimas nas correntes e nos gradientes de velocidade (Figura 14 e Figura 17) e as respectivas tendências de acreção e regressão de sedimentos transportados pela deriva litorânea para o período simulado (Figura 20).

A predominância de ondas com angulações originadas no quadrante Leste-Sul também pôde ser observada, bem como os efeitos de refração causados pelos costões rochosos, impondo uma orientação predominante de 90° nas ondas (Figura 13).

Os casos descritos neste trabalho mostram que o modelo DELFT3D-FLOW em conjunto com o módulo DELFT3D-WAVE é apropriado para a simulação de múltiplos processos relevantes em ambientes costeiros. Tal afirmação pôde ser constatada a partir da adição do transporte de sedimentos em suspensão e de carga de fundo associados às mudanças morfológicas, promovidas por correntes litorâneas geradas por diferentes forçantes no modelo, considerando ainda o sistema de estruturas marítimas

implementados na Orla de Matinhos. No entanto, ainda é fundamental a realização de um amplo número de estudos voltados à verificação e calibração do modelo, mesmo para as combinações mais simples de processos, bem como o aprimoramento e ampliação das informações que compõem o modelo, como por exemplo medições de sedimento para validação dos resultados, estudos de independência de malha, estudos de sensibilidade do parâmetro de rugosidade – uma vez que este parâmetro é variável no tempo e no espaço na realidade (LESSER, et al., 2004) – e testes com outras equações de transporte de sedimentos – considerando os estudos de Bos, Roelvink e Dingemans (1996) que apontaram que a escolha da fórmula para transporte de sedimento possui influência na morfologia resultante. Deste modo, sugere-se que esforços futuros foquem na definição de novas combinações de forçantes (levando em consideração, por exemplo, previsões de mudanças climáticas), na geração de conjunto de dados para validação de diferentes combinações de processos e resultados, no refinamento e no acréscimo das formulações numéricas, e em testes e aplicações do modelo.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo propôs uma atualização no entendimento do padrão hidrodinâmico e do transporte de sedimentos no litoral de Matinhos, após as obras realizadas com o objetivo de conter a erosão costeira na região.

Os testes realizados neste trabalho representam avaliações preliminares do potencial de um modelo de transporte de sedimentos para o local do estudo, visando fomentar investigações futuras a partir de uma referência inicial para comparações e reflexões. Os resultados confirmaram a aplicabilidade do sistema de modelagem DELFT3D nos estudos de transporte de sedimentos e alterações morfológicas em sistemas costeiros sob a ação combinada de forçantes.

A implementação desta ferramenta se mostrou eficiente no auxílio de análises dos processos hidrodinâmicos que regulam o transporte de sedimentos na região estudada, assim como na estimativa de possíveis alterações morfológicas na superfície de areia. Contudo, é importante destacar que os estudos foram realizados sobre uma batimetria interpolada e para um curto período de tempo, de modo que os resultados devem ser assimilados com ressalvas. A incorporação de uma batimetria atualizada, o refinamento da grade e uma avaliação em escala anual, incluindo ocorrências de grandes ressacas, poderão conduzir a interpretações de maior acurácia com relação ao comportamento e aos valores numéricos envolvidos no novo arranjo estrutural das praias de Matinhos.

A aplicação da metodologia de modelagem proposta possibilitou a análise hidrodinâmica e do transporte sedimentar em distintos cenários. Apesar da recomendação de que os resultados iniciais obtidos sejam preferencialmente interpretados de forma qualitativa quanto ao transporte de sedimentos, acredita-se que a viabilidade da metodologia de modelagem em casos complexos foi demonstrada.

Com um conjunto mais representativos de dados, um estudo quantitativo pode ser realizado no futuro considerando, assim como neste trabalho, a evolução morfológica na costa de Matinhos. Ademais, a metodologia aplicada pode ser empregada para avaliar distintas localizações de estruturas marítimas, visando propor soluções eficientes contra a regressão da linha de costa e erosões intensas, uma vez que novas intervenções semelhantes podem ocorrer na costa paranaense.

Somadas à todos os notáveis estudos que o antecederam, as informações geradas neste trabalho se configuram em um esforço de compreender os processos hidrodinâmicos gerados pela interação entre ondas e correntes, a partir da implantação das obras executadas na zona costeira de Matinhos, ensejando que novos estudos sejam realizados como forma de aperfeiçoar a compreensão da dinâmica costeira no litoral e a implementação de modelos numéricos que possam representar cada vez mais fielmente os efeitos naturais e antrópicos nos ambientes costeiros.

REFERÊNCIAS

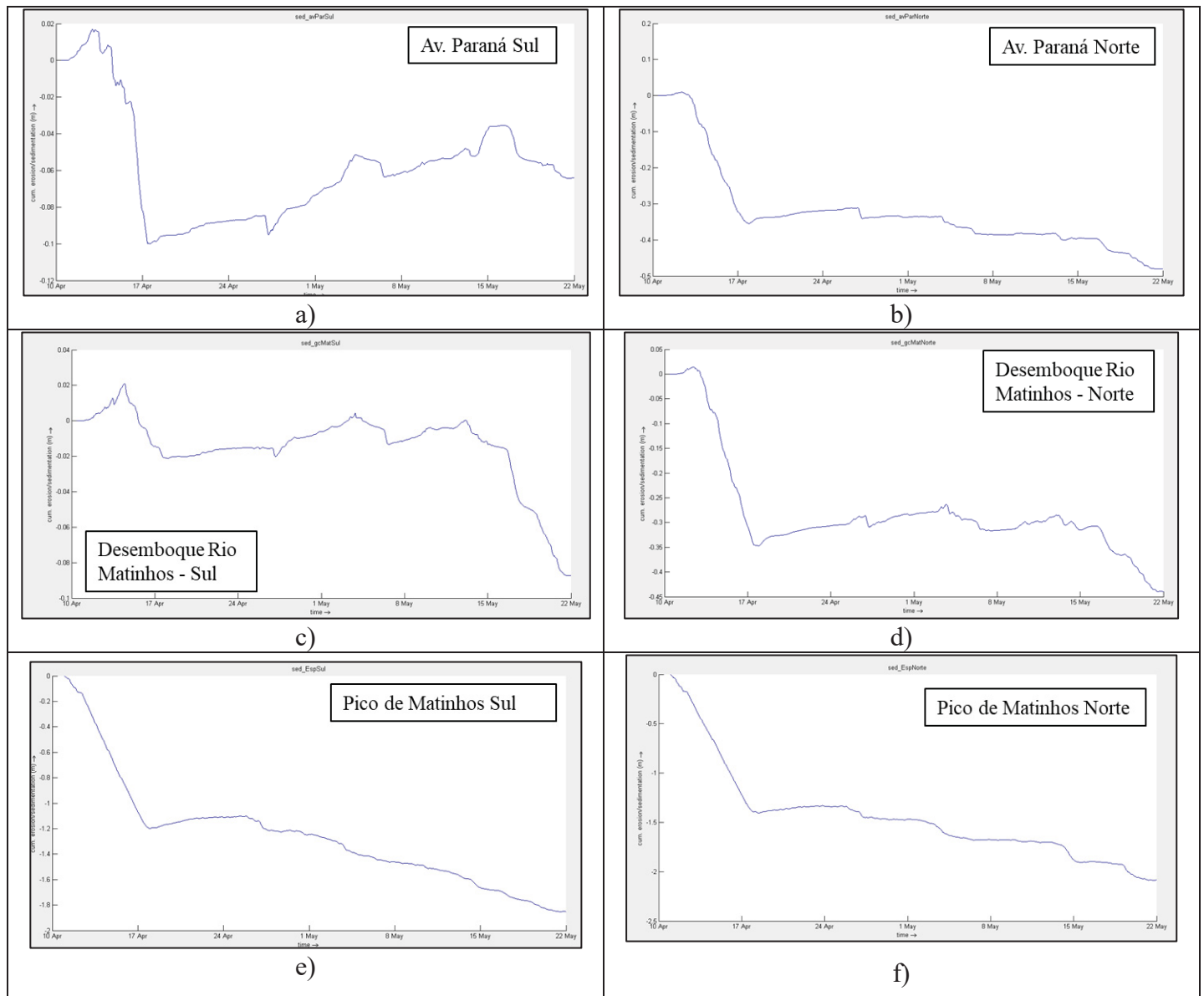
- Água e Minério. (2020). *Levantamento para Confirmação de Jazida de Areia para os Serviços de Engorda da Faixa de Praia – Recuperação da Orla de Matinhos*. Matinhos/PR.
- Alberti, A. L. (2010). *Variabilidade das correntes costeiras da plataforma interna rasa no balneário Shangri-Lá/PR*. Pontal do Paraná: Universidade Federal do Paraná.
- ANGULO, R. J. (2000). As praias do Paraná: problemas decorrentes de uma ocupação inadequada. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, 97-103.
- ANGULO, R. J., SOUZA, M. C., MÜLLER, M. E., NOERNBERG, M. A., OLIVEIRA, L. H., SOARES, C. A., . . . QUADROS, C. J. (2018). *Panorama da erosão costeira no Brasil: Paraná*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- AQUAMODELO. (2021). *Projeto Executivo de Proteção da Orla de Matinhos: Capítulo 2 - Enrocamento e Engordamento*. Rio de Janeiro: AQUAMODELO.
- Benoît, C., & Larroudé, P. (2020). Comparison of sediment transport formulae for a coastal environment. *Coastal Engineering*, pp. 111-132.
- BOOIJ, N. R., & HOLTHUIJSEN, L. H. (15 de April de 1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, pp. 7649-7666.
- BOS, K. J., ROELVINK, J. A., & DINGEMANS, M. W. (1996). Modelling the impact of detached breakwaters on the coast. *Coastal Engineering*, 2022-2034.
- DELTARES. (2024). *Delft3D-WAVE User Manual*. Delft: Deltares.
- Franz, G., Delpey, M. T., Brito, D., Pinto, L., Leitão, P., & Neves, R. (07 de 09 de 2017). Modelling of sediment transport and morphological evolution under the combined action of waves and currents. *Ocean Science*, pp. 673-690.
- GOBBI, E. F. (1997). *Gerenciamento costeiro: Análise de casos do litoral do Paraná sob a Perspectiva da engenharia costeira*. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ.
- GOVERNO DO PARANÁ. (2018). *Plano para o desenvolvimento sustentável do litoral do Paraná*. Curitiba: Governo do Paraná.
- HOLTHUIJSEN, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Waters*. New York: Cambridge University Press.
- IBGE. (2018). *Modelo de ondulação geoidal*. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística:
https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm
- Instituto Água e Terra. (2020). *Levantamento para confirmação de jazida de areia para serviços de engorda da faixa de praia*. Matinhos: Governo do Estado do Paraná.

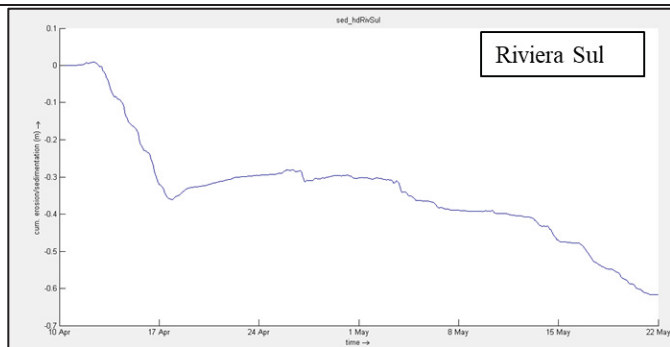
- Instituto Água e Terra. (2024). *Programa de monitoramento do volume praial*. Matinhos.
- Jones, O. P., Petersen, O. S., & Kofoed-Hansen, H. (2007). Modelling of complex coastal environments: Some considerations for best practise. *Coastal Engineering* 54, 717-733.
- LESSER, G. R., ROELVINK, J. A., VAN KESTER, J. T., & STELLING, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 883-915.
- LUERSEN, D. M., LOPES, A. B., FRANZ, G. A., MILDEMBERGER, D., & NOERNBERG, M. (2024). Sediment transport trend in an erosive sandy beach: the case of Matinhos Beach, south coast of Brazil. *Ocean and Coastal Research*, 1-17.
- MARONE, E., & JAMIYANAA, D. (1997). Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the estuarine complex of the bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. *Nerítica*, 95-107.
- MOREIRA, D. L. (2019). *Observações e modelagem numérica da hidrodinâmica e transporte de sedimentos em Matinhos (PR)*. Pontal do Paraná: Universidade Federal do Paraná.
- Mortlock, T. R., Goodwin, I. D., & Turner, I. L. (2014). Nearshore SWAN model sensitivities to measured and modelled offshore wave scenarios at an embayed beach compartment. *Australian Journal of Civil Engineering*, pp. 67-82.
- Nemes, D. D., & Marone, E. (2013). Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, 12-25.
- Noernberg, M. A., & Alberti, A. L. (2014). Oceanographic variability in the inner shelf of Paraná, Brazil: Spring condition. *Revista Brasileira de Geofísica*, 197-206.
- NOERNBERG, M. A., & RODRIGO, P. A. (2024). Direct hydrodynamic measurements at the upper shoreface of a sandy beach in Paraná - Brazil. *Ocean and coastal research*, 1-5.
- NOERNBERG, M. A., MARONE, E., & ANGULO, R. J. (2007). Correntes costeiras e transporte de sedimentos nos canais de navegação do estuário da Baía de Paranaguá. *Boletim Paranaense de Geociências*, 45-54.
- NOVAK, L. P., LAMOUR, M. R., & CATTANI, P. E. (2016). Vulnerabilidade aos processos erosivos no litoral do Paraná estabelecido pela aplicação da análise multicritérios. *RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise*, 195-220.
- OLIVEIRA, D. M. (2022). *Desenvolvimento e avaliação de um equipamento lagrangiano para aquisição de dados de correntes na zona de arrebentação praial*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- OLIVEIRA, M. F., OLIVEIRA, F. S., & TRIGO-TEIXEIRA, A. (2020). Modelling the morphodynamics in the vicinity of a submerged detached breakwater. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 131-143.
- Putnam, J. A., & Johson, J. W. (1949). The dissipation of wave energy by bottom friction. *American Geophysical Union*, 67-74.

- Rijn, L. C., Roelvink, J. A., & Horst, W. t. (2001). Approximation formulae for sand transport by currents and waves and implementation in Delft-MOR. *Tech.Rep.Z3054.40*, 39.
- SIMEPAR. (2023). *Monitoramento, previsão e alertas hidro meteorológicos e oceanográficos (Baía de Guaratuba, PR)*. Curitiba.
- SOARES, C. R., ANGULO, R. J., & LESSA, G. C. (1997). *Morfodinâmica de ambientes atuais, evolução da planície durante o quaternário e problemas de erosão costeira*. Curitiba: VI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário da América do Sul (ABEQUA).
- SOARES, L. P. (2019). *Análise do balanço sedimentar na praia na praia Brava, Matinhos-PR, a partir da modelagem numérica*. Pontal do Paraná: Universidade Federal do Paraná.
- SOUZA, C. R., FILHO, P. W., ESTEVES, L. S., VITAL, H., DILLENBURG, S. R., PATCHINEELAM, S. M., & ADDAD, J. E. (2005). Praias arenosas e erosão costeira. Em C. R. SOUZA, K. SUGUIO, A. M. OLIVEIRA, & P. E. OLIVEIRA, *Quaternário do Brasil* (pp. 130-148). Ribeirão Preto: Holos.
- STELLFELD, M. C. (2019). *Exposição ao risco de erosão costeira em frentes urbanas no município de Matinhos, litoral paranaense*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- Veiga, F. A. (2004). *Sedimentologia, morfologia e dinâmica da face da costa no litoral central do Estado do Paraná*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- VISSER, R. (2002). *Morphological modelling in the vicinity of groynes*. Delft: TUDelft.
- Zang, R., Zijlema, M., & Stive, M. (2018). Laboratory validation of SWASH longshore current modelling. *Coastal Engineering*, 95-105.

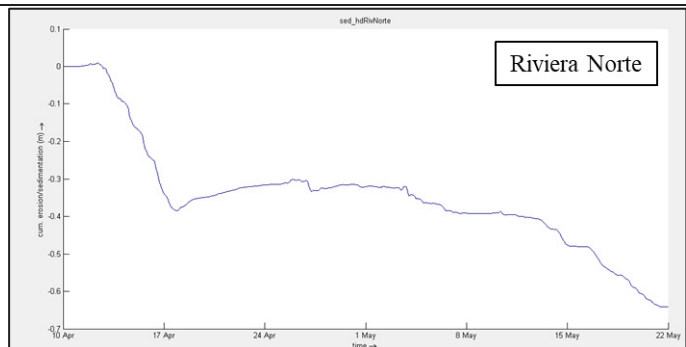
APÊNDICE 1

BALANÇO SEDIMENTAR NOS PONTOS DE OBSERVAÇÃO SEM A IMPLEMENTAÇÃO DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS

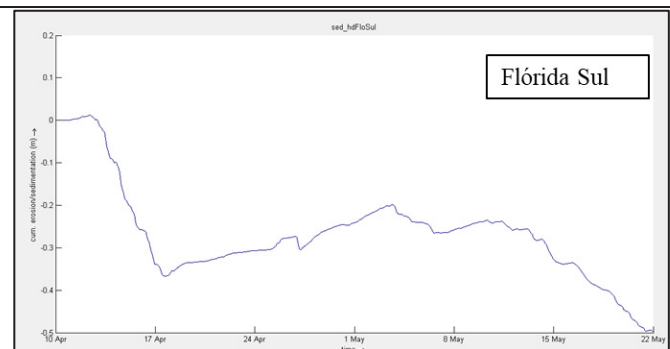




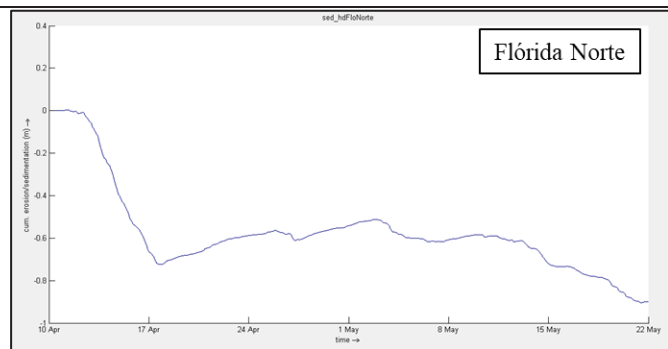
g)



h)



i)



j)