UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARINA FERREIRA ALVES

MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM DADOS TOPOBATIMÉTRICOS DO CANAL DE NAVEGAÇÃO NO RIO CABARAQUARA (GUARATUBA/PR)

> PONTAL DO PARANÁ 2022

KARINA FERREIRA ALVES

MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM DADOS TOPOBATIMÉTRICOS DO CANAL DE NAVEGAÇÃO NO RIO CABARAQUARA (GUARATUBA/PR)

Trabalho apresentado apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Civil no Curso de Engenharia Civil do Campus Pontal do Paraná - Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Profº Eduardo de Paula Kirinus

PONTAL DO PARANÁ

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP) UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DO CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

Alves, Karina Ferreira

A474m Modelagem hidrodinâmica com dados topobatimétricos do canal de navegação no rio Cabaraquara (Guaratuba/PR) / Karina Ferreira Alves. – Pontal do Paraná, 2022. 1 arquivo [65 f.] : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Curso de Engenharia Civil.

1. Hidrodinâmica. 2. Levantamentos topográficos. I. Kirinus, Eduardo de Paula. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD - 627

Bibliotecária: Fernanda Pigozzi CRB-9/1151



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Karina Ferreira Alves

"MODELGEM HIDRODINÂMICA COM DADOS TOPOBATIMÉTRICOS DO CANAL DE NAVEGAÇÃO NO RIO CABARAQUARA (GUARATUBA/PR)"

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus Prof. Orientador - CPP-CEM/UFPR

Prof. Dr. Alexandre Bernardino Lopes

CPP-CEM - UFPR

Prof. Dr. Fernando Augusto Silveira Armani **CPP-CEM/UFPR**

Pontal do Paraná, 06 de setembro de 2022.

Referência: Processo nº 23075.057405/2022-65

SEI nº 4870582

Dedico este trabalho aos meus pais, meu marido e meu falecido avô, Waldemar Ferreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e forças para superar as dificuldades dentro e fora da faculdade, incluindo cada cada vitória e derrota ao longo deste percurso, as quais me serviram de aprendizado, me tornando uma pessoa melhor e mais forte hoje a cada dia.

À minha mãe, Adriana Ferreira, guerreira e batalhadora, que acreditou no meu potencial desde o princípio, contribuindo diretamente na construção dos meus valores com toda sua atenção e carinho.

Ao meu pai, Odair dos Santos Alves, que me serviu como base de sustentação todos estes anos e que me ensinou a ser forte acima de tudo e de todos. Aproveito também a oportunidade para agradecer todo o aporte que me deram em casa, o amor, a paciência e tempo dedicado à minha criação, sem vocês, nada disso seria possível.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, que sempre estiveram torcendo por mim e que me motivaram a acreditar que tudo daria certo, mesmo quando eu mesma não acreditava nisso.

Ao meu companheiro de vida, Leandro, pela atenção, carinho e incentivo para finalizar minha trajetória acadêmica.

Meu orientador, Eduardo Kirinus, por ter abraçado esta ideia e principalmente pela paciência e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

E por fim, mas não menos importante, esta universidade, seu corpo docente, direção e administração, que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir no meu aprendizado.

"God is in the details" Ludwig Mies Van Der Rohe

RESUMO

O Litoral Paranaense é composto por duas principais desembocaduras, o estuário de Paranaguá e o estuário de Guaratuba, ambos caracterizados pela transição entre o meio terrestre e o oceânico. Esses ambientes são classificados como sistemas lagunares, condicionados a diversas forçantes naturais marítimas e fluviais, com características únicas, ecológica e economicamente importantes, responsáveis pelas drenagens de diversos bairros dos munícipios de Antonina, Guaraqueçaba, Morretes, Guaratuba, Pontal do Paraná e Matinhos, entre os vários rios e córregos, que por fim, se conectam ao mar aberto. Para avaliar a condição destes ambientes, utilizam-se simulações de modelos numéricos tridimensionais, baseando-se na análise dos processos de advecção e de mistura de massas de água, gerados pela dinâmica das marés e das descargas dos rios. O presente estudo visa a caracterização hidrodinâmica do rio Cabaraquara (Guaratuba, PR) a partir de levantamentos topográficos e batimétricos, além do desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico computacional, capaz de explicar e simular os processos oceanográficos deste rio, levando em consideração as condições atuais dos recursos hídricos da Costa Paranaense. Os resultados apontaram que, tanto a condições de maré, quanto a descarga fluvial na nascente de rio possuem capacidades suficientes para alterar as vazões. Em casos onde ocorre a ausência de precipitações de chuva, a maré advinda da baia torna-se a forçante dominante do sistema, fazendo com que os sedimentos presentes no ambiente tendam a assorear o rio, visto que o mesmo não possui força suficiente para transporta-lo. Os modelos gerados contribuíram para o melhor entendimento dos fenômenos atuantes e da correlação presente na dinâmica entre o rio Cabaraquara e Baia de Guaratuba. Além disso, os resultados encontrados neste trabalho trazem informações inéditas sob o comportamento hidrodinâmico da região de estudo, tendo em vista que o mesmo não se dispõe de nenhum dado ou estudo de caso, das guais, podem ser utilizados futuramente pelos gestores e tomadores de decisão para realizar novos estudos que viabilizam a população ribeirinha presente nas redondezas, que dependem do rio como fonte de renda por meio da pesca e como modal aquaviário.

Palavras-chaves: Estuário de Guaratuba. Modelagem Hidrodinâmica. Rio Cabaraquara.

ABSTRACT

The Coast of Paraná is composed of two main mouths, the estuary of Paranaguá and the estuary of Guaratuba, both characterized by the transition between the terrestrial and the oceanic environment. These environments are classified as lagoon systems, acclimatized to various maritime and fluvial natural forces, with important unique, ecological and economic characteristics, responsible for the drainage of several neighborhoods in the municipalities of Antonina, Guarçouba, Morretes, Guaratuba, Pontal do Paraná and Matinhos, between the various rivers and streams, which finally connect to the open sea. To assess the condition of these environments, simulations of three-dimensional numerical models are used, based on the analysis of the advection processes and mixing of water masses, generated by the dynamics of the tides and river discharges. The present study aims at the hydrodynamic characterization of the Cabaraquara River (Guaratuba, PR) from topographic and bathymetric surveys, in addition to the development of a computational hydrodynamic model, capable of explaining and simulating the oceanographic processes of this river, taking into account the current conditions of the rivers. water resources of the Costa Paranaense. The results showed that both the tidal conditions and the fluvial discharge at the source of the river have sufficient resources to change the flows. In cases where the absence of rainfall occurs, the tide coming from the bay becomes the dominant forcing of the system, causing the sediments present in the environment to tend to silt up the river, since it does not have enough strength to transport these The emotionally generated models for a better understanding of the acting phenomena and the dynamics present in the dynamics between the Cabaraguara River and the Guaratuba Bay. In addition, the results found in this work bring unprecedented information on the hydrodynamic behavior of the study region, considering that it does not have any data or case studies, which can be used in the future by managers and decision makers to carry out new studies that enable the riverside population present in the vicinity, which depends on the river as a source of income through fishing and as a waterway modal.

Key-words:

Guaratuba estuary. Hydrodynamic Modeling. River Cabaraquara.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 FIGURA 2 FIGURA 3 FIGURA 4 FIGURA 5	 ZONA COSTEIRA BRASILEIRA, ADAPTADO POR SOUZA COMPARTIMENTAÇÃO DA COSTA BRASILEIRA	19 20 22 24 26
FIGURA 6	- REPRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS RIOS E MANGUEZAIS, COM O COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ E A BAÍA DE GUARATUBA.	28
FIGURA 7 FIGURA 8	 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. DESTAQUE DAS ÁREAS URBANAS E REGIÕES DE MANGUE- ZAIS E BAIXIOS, ENTRE MATINHOS E GUARATUBA, NO LITO- RAL DO PARANÁ. 	29 30
		0.4
FIGURA 9	 – CAMADAS DO MODELO MORFODINAMICO. – PROCESSOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS JUNTO AO FUNDO. A) INÍCIO DA TRANSFERÊNCIA DE MOVIMENTO; B) 	34
	ROLAMENTO; C) SALTAÇÃO E D) ARRASTO	36
FIGURA 11	- ESQUEMA DE ACOPLAMENTO ENTRE O MODELO HIDRODI- NÂMICO E O MORFODINÂMICO	37
FIGURA 12	– FLUXOGRAMA APRESENTANDO A INTERAÇÃO COMPLETA ENTRE O MÓDULO TELEMAC-3D E SISYPHE	38
FIGURA 13	- MALHA COMPUTACIONAL DO MODELO E A BATIMETRIA IM-	00
		30 40
FIGURA 15	= CONDIÇÃO INICIAL - VABIAÇÃO DA SUPEBEÍCIE LÍQUIDA (M)	41
FIGURA 16		41
FIGURA 17	- CONDIÇÃO INICIAL - TEMPERATURA (°C)	42
FIGURA 18	– MARINA DO CEBOLA, EMBARCAÇÃO UTILIZADA NO LEVAN- TAMENTO BATIMÉTRICO	43
FIGURA 19	- REMO UTILIZADO COMO RÉGUA PARA MARCAÇÃO E COLETA DE DADOS	44
FIGURA 20	– DESEMBOCADURA DO RIO CABARAQUARA COM A BAÍA DE GUARATUBA	44
FIGURA 21	– PONTOS DOS LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	45

FIGURA 22 – COLETA DE DADOS BATIMÉTRICOS REALIZADA NO DIA 23/07/20	022.46
FIGURA 23 – ESQUEMA DO CONTORNO PERMEÁVEL TIPO BANCO DE	
MANGUEZAL	47
FIGURA 24 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DOS NÍVEIS.	47
FIGURA 25 – VARIÇÃO DOS NÍVEIS DE MARÉ, À DIREITA DO CANAL DE	
NAVEGAÇÃO	48
FIGURA 26 – VARIÇÃO DOS NÍVEIS DE MARÉ, À DIREITA DO CANAL DE	
NAVEGAÇÃO	48
FIGURA 27 – AMOSTRA AS VELOCIDADES MÉDIAS DE PROFUNDIDADES	
CRÍTICAS NO INÍCIO DO MOVIMENTO E SUSPENSÃO PARA	
SEDIMENTOS COM DIÂMETROS VARIANDO ENTRE 0,1 E 2MM	1.49
FIGURA 28 – VELOCIDADE DE SUPERFÍCIE DE FUNDO (M/S)	50
FIGURA 29 – VELOCIDADE DE SUPERFÍCIE MÉDIA (M/S).	50
FIGURA 30 – VELOCIDADE MÉDIA NA COLUNA D'ÁGUA E DIREÇÃO RESI-	
DUAL (M/S)	51
FIGURA 31 – VELOCIDADE MÁXIMA (M/S)	52
FIGURA 32 – ATRITO CISALHANTE COM O FUNDO MÉDIO (N/M ²)	53
FIGURA 33 – BED SHEAR STRASS MÉDIO NOS PONTOS DE INTERESSE	
(N/M)	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS PAÍSES EM ÁREA DE OCORRÊNCIA DO ECOSSIS	3-	
TEMA MANGUEZAL	. 2	3

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental		
DNH	Diretoria de Hidrografia e Navegação		
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica		
MEF	Método dos Elementos Finitos		
NMRM	Nível Médio Relativo do Mar		
R&D-EDF	Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Campanhia Elétrica Francesa		
UTM	Universal Transversa de Mercator		

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração gravitacional (m/s ²)
ν	Coeficiente da viscosidade cinemática (m²/s)
Z_s	Elevação de superfície do mar (m)
$ ho_0$	Massa específica de referência (kg/m³)
$\bigtriangledown^2(U)e \bigtriangledown^2(V)$) Operadores laplacianos no plano das coordenadas cartesianas
p	Pressão (Pa)
patm	Pressão atmosférica (Pa)
U	Primeira componente da velocidade (m/s)
z	Profundidade de uma camada qualquer (m)
z_f	Profundidade local medida na malha
V	Segunda componente da velocidade (m/s)
t	Tempo (s)
W	Terceira componente da velocidade (m/s)
F_x	Termo fonte da quantidade de movimento da equação u
F_y	Termo fonte da quantidade de movimento da equação v
riangle ho	Variação da massa específica (kg/m3)

SUMÁRIO

1 1.1	INTRODUÇÃO	15 17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2 1.2	Objetivos Específicos	17 17
2 2.1 2.2 2.3 2.4	REFERENCIAL TEÓRICOZONAS COSTEIRAS BRASILEIRASMANGUEZAIS E PROCESSOS HIDRODINÂMICOS ESTUARINOSTOPOGRAFIA E BATIMETRIAMODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL	19 19 21 24 26
3	ÁREA DE ESTUDO	28
4 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	METODOLOGIA	31 32 33 34 37 39
5 5.1 5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43 43 46
6	CONCLUSÃO	55
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXO 1 - LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO DO RIO CABARAQUARA.	63

1 INTRODUÇÃO

A ocupação e utilização das faixas litorâneas aumentou drasticamente no século XXI, acompanhada dos complexos industriais e da indústria pesqueira nos entornos, colocando em risco o desenvolvimento sustentável destes ambientes (L. B. MI-RANDA; BJÖRN, 2002), e como consequência, tornou-se cada vez mais escasso regiões costeiras que se encontram fora do domínio da humanidade. As maiores cidades do planeta estão localizadas em áreas costeiras com cerca de 40% da população do planeta vivendo a 60 Km da costa, e, portanto, são em maior ou menor grau, dependendo da vulnerabilidade de cada cidade, expostas a aumento do Nível Médio Relativo do Mar (NMRM), tempestades e inundações associadas. (HANSON et al., 2011).

A zona costeira ocupa uma área relativamente pequena em comparação com as demais superfícies da terra (<20%), porém, é um dos principais elos que controlam o ciclo hidrológico devido a transição entre os meios marinhos e terrestres, abrangendo desde bacias de drenagem fluvial até as frentes oceânicas sobre a plataforma continental (DANIEL, 1990). Além disso, a região costeira brasileira é composta de baias, praias, ilhas, dunas, falésias, estuário e inúmeros ambientes de importância ecológica, onde a ocupação humana e o desenvolvimento de suas atividades, em especial, ao redor de regiões protegidas como os estuários e baías, devido a vasta disponibilidade de recursos naturais, influenciam direta ou indiretamente os processos de transporte sedimentar, alterando os processos de retroalimentação dos sistemas estuarinos com os sistemas adjacentes.

No Litoral Sul, situada na região oriental do território paranaense, a costa litorânea dispõe-se de aproximadamente 6.600 Km², distribuídas em 98 Km de extensão; uma ampla planície costeira caracterizada por longas praias arenosas expostas, separadas pelas Baías de Guaratuba e Paranaguá (BIGARELLA et al., 1978), onde estão compostas por três principais de costas: estuarinas ou protegidas (1.316,8 Km), oceânicas ou de mar aberto (61,1 Km) e de desembocaduras (105,1 Km) (ANGULO; SOUZA; ARAÚJO, 2002).

O litoral paranaense é composto pelos municípios de Guaraqueçaba, Antonina, Morretes, Paranaguá, Pontal do Paraná, Matinhos e Guaratuba. De acordo com o último senso demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica - IBGE (IBGE, 2011), cerca de 26,58% da população vive em municípios da zona costeira. Parte dessa população está vinculada ao turismo local e pesca artesanal e esportiva, de forma direta ou indireta, e nos serviços que atendem à dinâmica econômica gerada por esses municípios e outros próximos há mais de duzentos anos (MIGUEL, 1997), onde na maioria das vezes, de maneira não planejada, resultando na supressão de áreas naturais, principalmente os ambientes costeiros sensíveis, como manguezais, restingas e encostas, regiões estas, caracterizadas como sendo ambientes estuarinos.

O estudo dos ambientes estuarinos foi iniciado há cerca de 120 anos por pesquisadores escandinavos, mas somente nos últimos cinquenta anos esses ecossistemas, muito vulneráveis à influência do homem, passaram a ser pesquisados, com o intuito de compreender a complexidade destes sistemas. (L. B. MIRANDA; BJÖRN, 2002; HALLEGATTE et al., 2013). Os sistemas estuarinos são ambientes que correspondem à área de transição, onde a água do escoamento continentes é misturada com a água marinha (PRITCHAD, 1967), controlados de um lado pela variabilidade climática nas bacias de drenagem e por outro lado, pela influência das marés. Segundo DYER (1998), são corpos d'água costeiros semifechados, com ligação livre com o oceano aberto, que se estendem rio acima até o limite da influência da maré.

Segundo o artigo sobre impactos ambientais na Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaratuba/PR (KANTEK; SAUTTER; MICHALISZYN, 2009), sob o ponto de vista de moradores tradicionais, as comunidades do Cabaraquara e Parati, no município de Guaratuba/PR, desenvolvem práticas extrativistas - pesca e manguezais (cultivo e coleta de ostras, mariscos e caranguejo). Existem alguns projetos de desenvolvimento sustentável, envolvendo as comunidades tradicionais, projetos de criação em confinamento de espécies marinhas nativas (Ex: cultivo de mostra e camarão).

Em virtude da utilização do acesso à Baía de Guaratuba por meio do canal de navegação do Rio Cabaraquara, a mudança do regime natural da descarga do rio e a urbanização das bacias de drenagem, além das próprias margens da baía, podem alterar o aporte natural dos sedimentos, bem como, os padrões de circulação de correntes, acarretando na interferência da distribuição dos sedimentos na região e, consequentemente, a morfologia do rio, do estuário e dos sistemas adjacentes. Essas mudanças estão relacionadas a circulação, os processos de mistura e estratificação presentes no estuário, bem como, as condições de maré, descargas fluviais, gradientes de densidade d'água, circulação adjacente e o vento que atuam sobre a superfície livre (KJERFVE, 1990; MIRANDA, 1996). Tais alterações podem provocar a destruição de ecossistemas importantes para o estuário, e também, para o cultivo de ostra que se faz presente próxima a região de estudo, bem como, gerar possíveis conflitos relacionados ao uso e ocupação do solo e leitos de rios.

Uma das opções para compreender as condições hidrodinâmicas e morfodinâmicas, além dos diversos processos atuantes sobre o Rio Cabaraquara, é a aplicação da modelagem numérica. A modelagem numérica baseia-se em medições e teorias sobre o comportamento do oceano, possibilitando simulações de seus processos. A vantagem da modelagem numérica está em sua fácil adaptação a diferentes domínios e modelos físicos, que são tipicamente construídos para representar condições específicas de um determinado local (WINTERWERP; WANG, 2013). Adicionalmente, a modelagem permite a determinação dos padrões de circulação hidrodinâmica, com custo e esforço amostral relativamente baixos, possuindo como vantagem, a capacidade de integrar dados e simular diversos cenários em tempo real, a fim de avaliar como os processos físicos e biológicos ocorrem, com diferentes padrões e escalas temporais e espaciais (WARNER, 2005).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da sedimentar da baía de Guaratuba sob o canal navegável do Rio Cabaraquara por meio de modelo computacional de elementos finitos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados batimétricos de modo manual, com o uso de varas graduadas e caderneta de campo;
- Desenvolver e simular um cenário numérico contendo áreas alagáveis;
- Analisar a hidrodinâmica do canal navegável do Rio Cabaraquara;
- Comparar a hidrodinâmica de um ponto interno ao canal de navegação com a hidrodinâmica de um ponto externo.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Rio Cabaraquara é visto como sendo o principal meio de acesso ao transporte fluvial para a população ribeirinha, servindo de fonte de renda para muitos moradores, oriundas da pesca artesanal e esportiva, onde ocorrem, por exemplo, na época de desova da tainha (conhecida como época do "rebojo", no qual faz parte da tradição caiçara litorânea). As embarcações, por sua vez, acessam ao rio através da Marina do Cebola (apelido dado ao Germano Passos, fundador da comunidade Cabaraquara), porém, por se tratar de um rio de pequeno porte, existe uma certa limitação entre as embarcações que podem descer e ter acesso ao rio em períodos de maré baixa, devido ao mesmo não ter aporte nem estrutura para embarcações de médio a grande porte.

Visando essa problemática, o presente trabalho tem por objetivo demonstrar a atual situação em que se encontra o Rio Cabaraquara, enfatizando a influências sedimentares e hidrodinâmicas que o estuário da Baia de Guaratuba interage com o rio, bem como, os padrões estuarinos relacionados aos processos de alagamento no canal de navegação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ZONAS COSTEIRAS BRASILEIRAS

A zona costeira ou Amazônia Azul como também é reconhecida, compreende toda a região emersa, a orla marítima e o mar territorial. Fonte de diversas biodiversidades biológica, além de seus recursos minerais e culturais, configura-se como patrimônio nacional¹ além do expressivo potencial turístico e portuário. Sendo apontada em alguns estudos como podendo ter uma riqueza maior que própria a "Amazônia verde" (VITAL; SILVEIRA; AMARO, 2005).



FIGURA 1 – ZONA COSTEIRA BRASILEIRA, ADAPTADO POR SOUZA.

FONTE: Gouveia Souza (2009)

¹ Conforme estabelece a Constituição Federal de 1988, em seu Título VIII, Capítulo VI, Artigo 225, Parágrafo 40, a Floresta Amazônica, a Serra do Mar, o Pantanal Mato-grossense e a Zona Costeira são considerados Patrimônio Nacional, ou seja, o conjunto de bens de uso comum, cujas características especiais lhe conferem posição especial, exigindo a preservação de suas condições básicas de existência.

Possuindo cerca de 600.000 Km², nas quais, aproximadamente 450.000 Km² correspondem ao território de 395 municípios distribuídos dentre os 17 estados costeiros, enquanto o Mar Territorial ocupa 150.000 Km². Aproximadamente 39 milhões de habitantes (23,43% da população total do país) residem nestas regiões, perfazendo uma densidade demográfica de 88 hab/Km², portanto, bem superior à média nacional (19,3 hab/Km²), concentrando-se, principalmente, em 16 das 28 regiões metropolitanas existentes no país.

Devido a esta estimava de densidade populacional nas regiões litorâneas, os ecossistemas presentes na região tornam-se cada vez mais vulneráveis. Não somente devido ao desenvolvimento populacional ao redor, mas também, aos possíveis eventos de elevações do NMRM. Os impactos devido a estas elevações geram diversas consequências no litoral, alterando a dinâmica costeira ali presente. Muehe (2010) subdividiu o litoral brasileiro em seis compartimentos de acordo com características da dinâmica costeira, conforme mostra a figura 2.



FIGURA 2 – COMPARTIMENTAÇÃO DA COSTA BRASILEIRA.

FONTE: Muehe (2010)

Essa subdivisão categoriza os ambientes em compartimentos tais quais:

- Compartimento I: Presença de grandes e profundos estuários, domínio de manguezais e grandes amplitudes de marés que em alguns locais podem chegar a 10 m;
- Compartimento II: Presença de falésias sedimentares oriundas do Grupo Barreiras e grandes campos de dunas. Pode ser subdividido tendo-se por base o deficit hídrico da região semiárida;
- Compartimento III: Também há presença de falésias sedimentares oriundas do Grupo Barreiras, porém com menos intensidade. Também possui praias bem desenvolvidas. Compartimento
- IV: Caracteriza-se por ter grande exposição a ondas de tempestade do Sul e também pelo equilíbrio dos transportes de sedimentos ao longo do ano, quando ondas de alta energia são menos frequentes;
- Compartimento V: É caracterizado pela proximidade com a Serra do Mar.
- Compartimento VI: Localiza-se entre o Brasil e o Paraguai, sendo caracterizado pela presença de praias com sedimentos finos e por sistemas lagunares.

2.2 MANGUEZAIS E PROCESSOS HIDRODINÂMICOS ESTUARINOS

Os manguezais são habitats costeiros, caracterizados por possuir uma vasta diversidade ecológica e possuir um ecossistema único. Formados por vegetação que cobrem cerca de 12 à 20 milhões de hectares no mundo (FAO, 2008), são predominantemente encontrados em zonas tropicais e subtropicais (SPALDING; KAINUMA; COLLINS, 2010; TOMLINSON, 2016), em linhas de costa sedimentares, composto principalmente por árvores e arbustos.

Este bioma costeiro de transição é adaptado exclusivamente às condições das marés e uma combinação especial de fatores que influenciam regiões litorâneas e estuarinas, como água do mar, inundação e exposição periódica, além de ondas e ventos, fortes correntes e escoamento, e presença de sedimentos finos (DUKE; BALL; ELLISON, 1998). Estas estruturas garantem a sustentação ao substrato inconsolidado, respiração aérea das raízes e excreção de sal.

Esse ecossistemas são capazes de se adaptar de acordo com a taxa de elevação ou decaimento de maré. Isso se da devido a fácil absorção da dissipação de energia gerada pela incidência de ondas no entorno da vegetação. Se a taxa de acumulo de sedimentos for similar à taxa de aumento do nível do mar, a distribuição dos sedimentos, em áreas de inundação, será mantida; caso contrário, é esperado que os manguezais migrem para o interior da linha de costa ou que sofram uma perda

significativa em sua extensão (SHEARMAN, 2010). Como resultado, são capazes de proteger a costa da erosão, pela absorção da energia das ondas através das forças de arrasto e forças inerciais (WOLANSKI, 2007).

Globalmente (figura 3), o ecossistema manguezal ocupa uma área de aproximadamente 152.361 Km², em 123 países, sendo a maior área presente na Indonésia (31.894 Km²). O Brasil é o segundo país em área total de manguezal (SPALDING; KAINUMA; COLLINS, 2010), com 13.000 Km² (o que corresponde a aproximadamente 8,5% do total mundial) e também detém a maior área continua de manguezal do mundo que é localizada no litoral da Amazônia legal (KJERFVE et al., 2002).



FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DOS MANGUEZAIS NO MUNDO.

FONTE: Spalding, Blasco e Fiel (1997)

País	Área de manguezal (Km^2)	Proporção do total global (%)	
Indonésia	31.894	20,9	
Brasil	13.000	8,5	
Austrália	9.910	6,5	
México	7.701	5,0	
Nigéria	7.356	4,8	
Malásia	7.097	4,7	
Miamar	5.029	3,3	
Bangladesh	4.951	3,2	
Cuba	4.944	3,2	
Índia	4.326	2,8	
Papua Nova Guiné	4.265	2,8	
Colômbia	4.079	2,7	

TABELA 1 – PRINCIPAIS PAÍSES EM ÁREA DE OCORRÊNCIA DO ECOSSISTEMA MAN-GUEZAL.

FONTE: Spalding, Kainuma e Collins (2010)

As florestas de manguezal normalmente estão presentes nos sistemas estuarinos, servindo de abrigo e berçários para inúmeros seres vivos. Geralmente estão alocados em canais com grandes áreas laterais, possuindo baixa declividade, são expostas em marés baixas e alagadas nas marés altas, fenômeno este que funciona como planícies de inundação (MAZDA; KANAZAWA; WOLANSKI, 1995).

Os estuários, conhecidos pelo seu potencial de transportar material em suspensão, são ecossistemas de transição entre o continente e o oceano, resultando na diluição da água salgada com água doce (PRITCHAD, 1967). Uma definição clássica dos estuários é descrita por CARMERON e PRITCHARD (1963):

"Um estuário é uma reentrância de mar num vale fluvial, estendendose até ao limite da propagação da maré dinâmica, e divisível em três setores (figura 4): a) o baixo estuário, ou zona marítima, com ligação aberta com o mar; b) o estuário médio, onde ocorre mistura intensa de água doce e salgada; e c) o estuário superior ou fluviomarítimo, com água doce, mas sujeito à influência da maré dinâmica."





FONTE: Fairbridge (1980).

2.3 TOPOGRAFIA E BATIMETRIA

Conforme a definição da norma NBR 13.133 (ABNT, 2021) item 3.12, um levantamento topográfico é um:

"Conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida, primordialmente, implanta e materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas. A estes pontos se relacionam os pontos de detalhes visando à sua exata representação planimétrica numa escala predeterminada e a sua representação altimétrica por intermédio de curvas de nível, com equidistância também predeterminada e/ou pontos cotados".

Existem diferentes maneiras de coletar esses dados topográficos, sejam eles através de teodolitos, distanciômetro, estações totais, níveis e sistemas de GPS.

A estação total por exemplo, é um equipamento para medições topográficas que fica posicionada em um local livre de obstáculos, emitindo feixes de laser que são refletidos em um prisma, retornando ao equipamento. Após medir todos os pontos necessários, os dados são armazenados e baixados para um computados, onde é realizado o traçado ou construção aferida.

Com os avanços tecnológicos, é permitido que os dados sejam coletados com maiores precisões (AEROENGADMIN, 2019), com a implementação e uso de equipamentos eletrônicos, como drones, scanner a lases, fotogrametria, entre outros.

Por outro lado, para estimar a profundidade na interface submersa é necessário a realização de um levantamento batimétrico. O levantamento batimétrico pode ser definido como a continuidade da topografia entre duas margens, a fim de se conhecer o terreno submerso na água, suas rofundidades e feições.

No Brasil, o levantamento e manutenção destes dados são de responsabilidade da Marinha do Brasil, por meio da DNH (Diretoria de Hidrografia e Navegação). Esses dados são disponibilizados por meio de cartas náuticas, onde estão inseridos dados representativos sobre a natureza do fundo do mar, indicando os perigos existentes na região, tais como rochas isoladas, restos de naufrágios e arrebentações, entre outros sinais (MATHIAS; BOND, 1983), além das profundidades e altitudes, normalmente expressas em metros.

As cartas náuticas são constituídas por uma simbologia própria e apresentam uma série de informações, de extrema utilidade para o navegador. Barros (2003) desta as seguintes informações fornecidas pelas cartão que são de conhecimento primordiais:

- (a) Título da Carta e Número de Ordem: indicam o país, a parte do litoral e o trecho que a carta cobre;
- (b) Profundidades e Altitudes: são expressas em metros. As profundidades reduzidas aproximadamente ao nível da baixa-mar, média de sizígia, ou seja, nas condições de mínimo de água no local. As altitudes em metros acima do nível médio;
- (c) Notas sobre precauções: geralmente em letras vermelhas e que devem sempre ser lidas com atenção pelo navegante;
- (d) Observação sobre continuação da carta: quando existente, escrito a carmim junto às laterais e margens;
- (e) Rosas dos Ventos: dispostas em um ou mais lugares das cartas náuticas, acham-se traçadas uma ou duas rosas. Quando existe uma só, ela tem direção N-S na direção dos polos N e S verdadeiros da Terra e, portanto, quando usada fornecerá indicações verdadeiras. Quando existem duas (o que é mais comum) a rosa externa oferece indicações verdadeiras e a rosa interna, indicações magnéticas;
- (f) Declinação Magnética: no interior da Rosa dos Ventos está escrito o valor da declinação magnética do local, para um determinado ano, bem como, o respectivo aumento anual;
- (g) Auxílio a Navegação: faróis e rádio faróis, boias e balizas, com suas características estão indicadas na carta náutica.

A figura a seguir, representa a carta náutica da Baía de Guaratuba.



FIGURA 5 – CARTA NÁUTICA DA BAÍA DE GUARATUBA

FONTE: Marinha do Brasil, 2022.

As profundidades podem ser obtidas de forma direta ou indireta, com o uso de prumo de mão ou com ecobatímetros monofeixe e/ou multifeixe. Existe também, a possibilidade de utilizar o sensoriamento remoto para a obtenção estimadas de profundidade em águas rasas (KRUG; NOERNBERG, 2007).

A realização de levantamentos batimétricos em áreas de pequena profundidade também podem ser executadas de maneira manual, com o registro a partir de medições de altura da lâmina d'água em réguas linimétricas graduadas em pontos distintos. Neste caso, as réguas devem ser niveladas em relação ao referencial vertical ou nível de redução, como são chamadas nas cartas náuticas.

2.4 MODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL

A modelagem numérica e computacional tem se mostrado uma importante ferramenta para a gestão e o monitoramento de recursos ambientais, especialmente dos corpos hídricos.

Diante da complexidade dos processos existentes nos ambientes aquáticos, os modelos numéricos computacionais têm se mostrado uma ferramenta indispensável em estudos ambientais em áreas costeiras e *offshore*. Seja para estudos que consideram a intervenção humana em áreas costeiras, ou para a previsão do provável destino de contaminantes, como é o caso de óleo e efluentes de emissários submarinos, os modelos numéricos computacionais são capazes de fornecer a possibilidade de uma análise dinâmica dos parâmetros em questão. Diferentes configuração de projeto podem ser testadas em um curto espaço de tempo e com custos reduzidos, auxiliando na tomada de decisão.

Visando a necessidade de conservação em áreas de preservação ambiental, em regiões onde existe a incidência de Mata Atlântica, estudos e projetos relacionados a auxílio a gestão e ao gerenciamento ambiental dos recursos hídricos vem sendo desenvolvidos nos últimos anos, devido a complexidade em que esses ambientes estão inseridos no litoral paranaense, especialmente em lagos, reservatórios, estuários e zonas costeiras adjacentes das bacias hidrográficas.

Nos últimos anos abriu-se um nova gama de aplicações para estudos de modelagem hidro-morfodinâmica: as operações de dragagem. Nesse sentido, essa ferramenta vem sendo utilizada para a previsão de volumes e periodicidade que essas atividades irão ser realizadas, bem como, podem ser utilizados para prever/avaliar potenciais impactos relacionados a essas operações, como por exemplo: modificações nos padrões hidrodinâmicos, sedimentares, tempo de renovação de água, ecológicos e dispersão de pluma de sedimentos finos contaminados ou não nos corpos d'água (MILLIMAN et al., 1985; SYVITSKI et al., 2005; WANG et al., 2013; BECKER et al., 2015; ZHAO et al., 2018).

A modelagem numérica consiste na representação matemática do que acontece na natureza, a partir de um modelo conceitual, idealizado com base no levantamento e na interpretação de dados e em observações do sistema real. Tem como objetivo uma melhor compreensão do sistema real, que possibilita prever situações futuras com uma constante atualização de dado e, algumas vezes, situação passadas, mas sempre buscando direcionar ações de decisão (IRITANI, 1999).

Com o crescente desenvolvimento humano em regiões costeiras, há também a necessidade de melhor conhecimento da hidrodinâmica local, e de modelos de qualidade de água na gestão de poluição. Tais modelos necessitam de replicar o domínio hidrodinâmico em áreas com manguezais (STRUVE; FALCONER; WU, 2003).

Estudos relacionados a influência de elevação do nível do mar sobre o ecossistema manguezal são pautados no uso do sensoriamento remoto para acompanhamento da dinâmica de sua área de ocorrência (LARA; COHEN, 2003); (FILHO, 2005) ; (LACERDA; MENEZES; MOLISANI, 2007); (NASCIMENTO et al., 2013), e estudos de cunho geológico, com uso de marcadores radiométricos para entendimento de ocorrência do manguezal no período pós glacial no Holoceno (GUIMARÃES et al., 2010). Conduto cabe mencionar que ainda são raros os estudos que objetivam a antecipação dos efeitos da elevação do nível do mar no manguezal (SILVA BEZERRA; AMARAL; KAMPEL, 2013).

3 ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Guaratuba possui cerca de 50 Km² e 15 Km de comprimento, onde sua única conexão com o Oceânica Atlântico é feita por uma estreita desembocadura, de aproximadamente 500 metros de largura, limitada por pontais rochosos do extremo meridional da Serra da Prata, ao norte, e do Morro de Guaratuba, ao sul (SOARES; ANGULO; LESSA, 1997). Caracterizada como sendo um estuário raso, de aproximadamente 24% da sua área líquida composta por ambientes com a presença de bancos de lama e areia (MARONE, Eduardo et al., 2004) e 15% da área, com profundidade média de 3,00 metros, onde em alguns pontos chegam a alcançar 6,00 m (CHAVES; CORRÊA, 1998). Os extensos baixios e planícies de maré ficam expostos em condições de baixa-mar de sizígia.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS RIOS E MANGUEZAIS, COM O COM-PLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ E A BAÍA DE GUARATUBA.



FONTE: Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento CEM/UFPR (2005)

O Rio Cabaraquara constitui o objeto de estudo deste trabalho, e se localiza no sistema estuarino da Baía de Guaratuba (Figura 7), no município de Guaratuba/PR, porção sul da planície costeira do Estado do Paraná (25º 52' S, 48º 38' W), território definido como estuário de vale inundado com canal subaquático de drenagem e fontes fluviais bem definidas (BRANDINI, 2008).

A respeito da salinidade, estudos apontados por Jacobi (1953), informam que a água atinge os valores mais elevados no inverno e os mais baixos no verão. Em eventos extremos, com a presença de fortes precipitações de chuvas, a salinidade na desembocadura

chega próxima à zero, inviabilizando o cultivo camarão nesta região, segundo informações de pescadores e moradores locais.



FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

As marés presentes da região são caracterizadas como sendo marés semi-diurnas, aonde alcançam amplitudes máximas e mínimas de 2,0 e 0,5 m ((MARONE, E. et al., 2006)). O regime de ondas incidentes está vinculado aos seus longos centros de geração em áreas oceânicas distantes, gerando uma deriva litorânea orientada para norte, que é intensificada em eventos de chegada de sistemas frontais (RIBEIRO, 2006).

Com relação aos processos de transporte no local, estudos desenvolvidos por Angulo (1992), descrevendo que é possível identificar a existência de extensos baixios em forma de arco, que se estendem da desembocadura em direção ao mar na plataforma continental, configurando um delta de maré vazante, onde foi notada a eficiência de transporte nas correntes de maré vazante (SALAMUNI; BIGARELLA, 1962; ANGULO, 1993).

A região próximo ao local de estudo, entre a boca estuarina e o canal de maré próximo a desembocadura da baía, é descrito por Zem (2005) que parte dos sedimentos são compostas por areias grossas, nas quais, apresentam pouco conteúdo de matéria orgânica e nas regiões

FONTE: A Autora, 2022.

internas da baía, ocorre a predominante de leito arenoso, de origem fluvial, devido a proximidade com os rios São João e Cubatão.



FIGURA 8 – DESTAQUE DAS ÁREAS URBANAS E REGIÕES DE MANGUEZAIS E BAIXIOS, ENTRE MATINHOS E GUARATUBA, NO LITORAL DO PARANÁ.

FONTE: Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento CEM/UFPR (2005)

A região abrangida pela modelagem hidrodinâmica está delimitado entre a jusante do canal de navegação, próximo a Marina do Cebola, se prolongando por cerca de 420 metros até a desembocadura do rio com a Baía, área abrigada dentro da floresta de preservação ambiental, a Mata Atlântica, dominada por uma natureza exuberante, com bosques de manguezais.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada na elaboração do modelo numérico na área de estudo, bem como, a descrição do próprio modelo e na descrição das condições dos dados de entrada.

A metodologia deste estudo baseia-se na aplicação conjunta de modelos numéricos tridimensionais, onde o primeiro consiste em um sistema hidrodinâmico tridimensional TELEMAC-MASCARET¹, através do módulo hidrodinâmico TELEMAC-3D, e o segundo, como um módulo morfodinâmico SISYPHE. Estes módulos são utilizados para estudos de aspectos relacionados a a hidrodinâmica tridimensional de escoamentos com superfícies livres de rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas.

A aplicação de modelos hidrodinâmicos e estudos com esses sistemas foram realizados por Fernandes (2001), em que utilizaram simulações bidimensionais e tridimensionais para descrever as principais forçantes de circulação estuarina. Assim como, Marques, Fernandes, Monteiro et al. (2009), Marques, Fernandes e Moller (2010a) e Marques, Fernandes, Moraes et al. (2010b) e Kirinus et al. (2012) realizaram uma série de estudos numéricos tridimensionais na região da Plataforma Continental do Sul do Brasil, onde descreveram as forçantes que controlam a formação, comportamento e destinação final da pluma da Lagoa dos Patos.

4.1 MODELO HIDRODINÂMICO - TELEMAC-3D

O modelo tridimensional TELEMAC-3D se utiliza do Método dos Elementos Finitos (MEF) para solucionar processos hidrodinâmicos, por meio das equações de Navier-Stokes, assumindo ou não condições de pressão hidrostáticas, onde são aplicadas ao sistema de coordenadas sigma, na discretização vertical, de maneira a acompanhar os limites de superfície e de fundo, considerando a evolução livre como função de tempo, utilizando conjuntamente equações de advecção e difusão, ignorando o efeito da variação de densidade na equação da conservação de massa e considerando a aproximação de Boussinesq para resolver equações de momento.

Os módulos que integram ao sistema TELEMAC, além de serviram como fonte de estudos para aspectos relacionados à hidrodinâmica, também são utilizados para o estudo de relacionados ao transporte de sedimentos e ondas geradas pelo vento em regiões costeiras e oceânicas (HERVOUET, 2007)

De acordo com Hervouet (2007), o MEF é considerado o método mais adequado para se solucionar sistemas de equações diferenciais relacionados à sistemas hidrodinâmicos em transição, por exemplo, como o Rio Cabaraquara, o estuário da Baía de Guaratuba e a região de mangue na costa adjacente presente neste estudo.

¹ www.opentelemac.org

O MEF utilizado pelo TELEMAC-3D permite a melhor representação dos elementos na grade computacional, além de possibilitar a aplicação de maiores níveis de refino na malha numérica, em áreas de interesse específico, como a morfologia costeira e batimetria local, resultando na elevação do nível do mar, nas componentes das velocidades de correntes e nas concentrações dos traçadores em cada ponto do domínio computacional. Descrições sobre o equacionamento e a parametrização do modelo são presentadas ainda por Hervouet (2007) e também podem ser encontradas no manual de operação do modelo (DESOMBRE; LANG, 2016)

4.1.1 Equacionamento do Modelo TELEMAC-3D

Desenvolvido por Jean-Michel Hervouet (HERVOUET, 2007), todo o equacionamento do modelo TELEMAC-3D foi elaborado a partir de 1987, no Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Campanhia Elétrica Francesa (RD-EDF).

A equação da continuidade e a equação da conservação da quantidade de movimento, equações base das formulações de Navier-Stokes, são obtidas através das relações da dinâmica dos fluidos geofísicos, e representadas em um sistema de coordenadas cartesianas. No módulo tridimensional, o modelo TELEMAC-3D leva em consideração as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq para resolver as equações de Navier-Stokes, além de solucionar utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial e discretização vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo (Hervouet e Van Haren, 1996; Hervouet, 2007). Para que a maioria das equações possa responder a hipótese da pressão hidrostática é aplicada, a pressão sendo representada na equação .

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$
(4.1)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} + W\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \bigtriangledown^2 (U) + F_x$$
(4.2)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + W\frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \bigtriangledown^2 (V) + F_y$$
(4.3)

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U\frac{\partial W}{\partial x} + V\frac{\partial W}{\partial y} + W\frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \bigtriangledown^2 (W) + F_z$$
(4.4)

$$p = p_{atm} + \rho_o g(Z_s - z) + \rho_o g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz + p_d$$
(4.5)

Onde,

- U, V e W representam as componentes da velocidade (m/s);
- t é o tempo (s);

- g a aceleração da gravidade (m/s²);
- Z_s é a elevação da superfície (m);
- z profundidade de uma camada qualquer (m);
- ν é o coeficiente da viscosidade cinemática (m²/s);
- p é a pressão (Pa);
- patm é a pressão atmosférica (Pa);
- ρ_0 é a massa espefícia média;
- △ρ a variação da massa específica (kg/m³);
- F_x e F_y os termos fonte nas direções x e y, respectivamente;
- $\bigtriangledown^2(U)e \bigtriangledown^2(V)$ são os operadores laplacianos no plano das coordenadas cartesianas.

A aproximação hidrostática considera a exclusão após análise de escala dos termos da velocidade vertical, W, por possuírem pequenas escalas, desprezando a difusão, os termos fonte e a aceleração na vertical. Portanto, os termos que consideram as variações da pressão hidrostática e da gravidade são mantidos na equação vertical de quantidade de movimento, onde a pressão em um ponto depende apenas da pressão atmosférica na superfície e do peso da coluna de água sobre a porção do fluido. Entretanto, o modelo TELEMAC-3D permite ao usuário escolher qual as variações de pressão na coluna de água calcular, através da opção não-hidrostática, onde o termo W recebe equacionamento semelhante aos termos $U \in V$.

O algoritmo básico do TELEMAC-3D pode ser divido em 3 passos computacionais (três passos fracionados) (PHAM; JOLY, 2016). O primeiro passo, consiste em encontrar a componente da velocidade advectada, apenas resolvendo os termos advectivos nas equações do momentum. No segundo passo computado, a partir das velocidades advectadas, a nova componente da velocidade leva em conta os termos difusivos e os termos fontes na equação da conservação da quantidade de movimento. Estas duas soluções permitem encontrar um campo de velocidade intermediário. Por último, o terceiro algoritmo calcula a superfície livre, através da integração vertical das equações da continuidade e do momentum, incluindo os termos de pressão. Todos os outros termos são levados em consideração nos dois passos anteriores.

4.2 MODELO MORFODINÂMICO - SISYPHE

O módulo SISYPHE é responsável pela simulação de transporte de sedimentos, correspondente a parcela morfodinâmica, o qual faz parte do sistema de modelagem numérica open TELEMAC-MASCARET. Neste módulo, são calculadas em cada ponto da malha, as taxas de transporte dos sedimentos, onde são divididas em duas cargas, uma carga representativa de material transportado junto ao fundo (*bedload*) e outra carga de material em suspensão (*suspended load*), como função de fluxos de velocidade, profundidade de água, altura da onda,

etc., além dos parâmetros de sedimentos, como o diâmetro do grão, a densidade relativa, velocidade de sedimentação, entre outros.

Neste estudo, foi utilizada somente a opção de transporte de sedimentos por carga de material transportado junto ao fundo (*bedload*).

A aplicação do módulo SISYPHE é indicado para sedimentos não coesivos (uniformes ou graduados), sedimentos coesivos e misturas de areia-lama, como é caracterizado na região de estudo, nas quais, são representadas por um número finito de classes, contendo descrições referentes ao diâmetro médio de cada sedimento, densidade do grão e velocidade de sedimentação, além disso, os processos de transporte podem levar em consideração os efeitos de inclinação do fundo, dos leitos rígidos e das correntes secundárias. Trabalhos com estas condições hidrodinâmicas, incluindo rios, estuários e aplicações costeiras, podem ser citados (JACOUB et al., 2007), (TASSI, 2007), (VILLARET, 2012).

4.3 ACOPLAMENTO ENTRE O MÓDULO TELEMAC-3D E SISYPHE

Para compreender a relação entre o modelo SISYPHE e as camadas de fundo, Kirinus (2017) faz a seguinte representação por meio da figura 9. A cor azul representa a parcela hidrodinâmica da malha, dominada pelos cálculos advindos do modelo TELEMAC-3D, espaçado verticalmente pelas camadas sigma. Em marrom, é a representação da porção sedimentar, no qual, o modelo SISYPHE realiza a mobilização dos sedimentos. E em cinza, é denominada de camada rígida, que tem por finalidade, a limitação da malha numérica em sentido vertical. Abaixo deste camada, encontra-se o fundo rígido, o limite inferior da malha numérica.



FIGURA 9 - CAMADAS DO MODELO MORFODINÂMICO.

FONTE: Kirinus (2017).

Entre as camadas hidrodinâmicas do modelo TELEMAC-3D e de sedimentos, do modelo SISYPHE, existe uma camada intermediária, resultante das transferências de energia

das correntes, gerando consequentemente, os processos de transporte junto ao fundo *(bedload)* ou a suspensão dos sedimentos.

Tratando-se de interações fluido-sedimento, o acoplamento entre os dois modelos faz com que o coeficiente de arrasto com o fundo seja alinhado à velocidade próxima ao fundo, possibilitando a inclusão de possíveis desvios por fluxos verticais. Isso faz com que a magnitude do coeficiente de arrasto com o fundo esteja relacionada diretamente com a velocidade integrada na vertical, exceto quando a Lei de Fricção de Nikuradse é aplicada.

O atrito cisalhante, gerado pela corrente em contato com o fundo, faz com que as partículas comecem a se mover através de rolamento, saltação e arrasto. Esse fenômeno é conhecido como *bedload* (figura 10), onde basicamente é a tendência do material a ser transportado junto ao fundo.

O sistema open TELEMAC-MASCARET possui duas formas distintas de acoplamento. O primeiro consiste no método de corrente, na inclusão de resultados e simulações pretéritas. O segundo modelo, é o acoplamento interno, utilizando módulos interativos durante cada passo de tempo do modelo, correlacionando mudanças em parâmetros em tempo real.

Para este trabalho, foi utilizado o segundo método, onde o SISYPHE é acoplado ao modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D. Para que isso ocorra, o modelo SISYPHE é chamado dentro do modelo hidrodinâmico, onde realiza trocas de dados através do uso direto de memória.

Para compreender melhor como isto funciona, Kirinus (2017) demonstra por meio da figura 11, onde em A) o modelo inicia os cálculos considerando uma condição de fundo inicial tanto para a hidrodinâmica, quanto para a morfodinâmica, em passo de tempo inicial $t_{sn} = 0$; B) o modelo é inicializado após um intervalo de tempo, a velocidade é alterada e gera uma corrente u^n ; C) o modelo SISYPHE é acionado, inserindo uma nova velocidade u^n , gerando movimento de carga pelo fundo (q^b) ; D) o modelo morfodinâmico calcula todo o processo de movimento e retorna a nova batimetria resultante da influência da velocidade neste passo de tempo.

FIGURA 10 – PROCESSOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS JUNTO AO FUNDO. A) INÍCIO DA TRANSFERÊNCIA DE MOVIMENTO; B) ROLAMENTO; C) SALTA-ÇÃO E D) ARRASTO



FONTE: Kirinus (2017).

FIGURA 11 – ESQUEMA DE ACOPLAMENTO ENTRE O MODELO HIDRODINÂMICO E O MORFODINÂMICO



FONTE: Kirinus (2017).

4.4 MALHA COMPUTACIONAL

Inicialmente, para que o módulo TELEMAC-3D inicie a simulação hidrodinâmica no domínio computacional estabelecido, é necessário informar as condições físicas do ambiente no entorno deste domínio. As informações referente as condições físicas são inseridas como condições inciais e condições de contorno.

Os dados batimétricos referentes a coleta de campo (sessão de resultados) foram agrupados e inseridos no software *BlueKenue*, desenvolvido pelo CHC (*Canadain Hydraulic Centre*²) para a geração da malha numérica de elementos finitos. O domínio do modelo abrange o canal navegável do Rio Cabaraquara, incluindo a parte alagável do mangue (foi considerado 5 metros de área alagável na área de espraiamento do canal) e a região costeira adjacente,

² https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/bluekenuetm-software-tool-hydraulic-modellers

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA APRESENTANDO A INTERAÇÃO COMPLETA ENTRE O MÓ-DULO TELEMAC-3D E SISYPHE.



FONTE: Adaptado de Kirinus (2017).

pertencente a Baía de Guaratuba.

Neste trabalho foi desenvolvido uma malha de elementos finitos não estruturada, contendo 12.407 nós e 23.949 elementos triangulares, contendo uma profundidade máxima de -3,00 metros e altura máxima de 1,5 metros.





FONTE: A Autora, 2022.

Foram definidos os limites entre as bordas alagáveis do Rio Cabaraquara, entre o percurso do canal de navegação que consiste na rampa de acesso à Marina do Cebola até a desembocadura do estuário da Baía de Guaratuba. A utilização destas malhas consiste na triangulação não estruturada, que são capazes de proporcionar uma boa representação das características batimétricas e morfológicas do local estudado.

A discretização das malhas está baseada no método dos elementos finitos, nas quais, utilizam-se de prismas com seis nós, de forma que, seus lados verticais são quadrangulares. Para que o modelo possa evoluir de acordo com um passo de tempo para o outro, a superfície livre do modelo precisa variar entre as elevações z da malha. A variação adotada neste trabalho foi a de transformação sigma, onde consiste em transformar um sistema de coordenadas verticais para um sistema z* independente do tempo, conforme descrita na equação abaixo:

$$z* = \frac{z - z_f}{Z_s - z_f} \tag{4.6}$$

Onde,

- z_f representa a profundidade local medida na malha (m);
- Z_s é a elevação da superfície livre (m).

Essa transformação é utilizada nas equações da conservação da quantidade de movimento e de concentração de traçadores, para que seja feito a troca de coordenadas (x,y,z) para o sistema de coordenadas (x,y, σ), permitindo acompanhar os limites superficiais e de fundo.

Cada ambiente costeiro requer um nível sigma específico, a escolha deve levar em consideração o custo computacional, a qualidade da estrutura do fluxo tridimensional e o modelo utilizado. Neste estudo foram utilizados apenas 6 níveis sigmas, levando em consideração que trata-se de um rio com profundidades muito pequenas em um percurso com menos de 500 metros.

4.5 CONDIÇÕES INICIAIS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições iniciais e de contorno são variáveis pré-estabelecidas do modelos, sendo elas, componentes de marés astronômicas (figura 14), de velocidade (figura ??) e direção de correntes, salinidade (figura 16) e temperatura (figura 17). No módulo hidrodinâmico - TELEMAC-3D, os dados de condição iniciais são impostos em todos os nós da malha numérica.

Já no módulo morfodinâmico (SISYPHE), a condição inicial é realizada através de parametrização, onde é imposta a distribuição homogênea de sedimentos em toda a malha computacional. Devido a ausência de dados sedimentológicos e por se tratar de um estuário

com a presença de mangue, foi adotado sedimentos com granulometria de 0,1875 mm, estando entre as classes de areia fina e muito fina.

Além das condições iniciais citadas anteriormente, o modelo numérico necessita de condições de contorno para realizar o cálculo através da evolução de suas variáveis. Para as simulações deste estudo, foram utilizadas condições de contorno referentes a salinidade, temperatura, intensidade de corrente e níveis de varição da superfície líquida, e condições atmosféricas como vento, temperatura do ar e pressão atmosférica.



FIGURA 14 – CONDIÇÃO INICIAL - INTENSIDADE DE CORRENTE (M/S)

FONTE: A Autora, 2022.



FIGURA 15 - CONDIÇÃO INICIAL - VARIAÇÃO DA SUPERFÍCIE LÍQUIDA (M)

FONTE: A Autora, 2022.



FIGURA 16 - CONDIÇÃO INICIAL - SALINIDADE

FONTE: A Autora, 2022.



FONTE: A Autora, 2022.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das coleta de dados batimétricos para adicionar a batimetria no modelo numérico além das analises das simulações hidrodinâmicas do modelo TELEMAC-3D e SISYPHE para o Rio Cabaraquara.

5.1 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

A utilização do modelo computacional como análise de resultados consiste na aplicação direta de levantamentos hidrográficos da região servindo de base para estruturação da malha batimétrica, fonte esta, muitas vezes fornecida através de cartas náuticas disponibilizadas pela Marinha do Brasil.

O contorno sólido do modelo deve ser configurado com a batimetria da região de estudo. Devido a ausência ou pouca frequência de dados na região costeira, o local de estudo não dispõem-se de dados hidrográfico na carta náutica disponibilizada pela Marinha do Brasil, sendo assim, foi necessário a realização de levantamento batimétrico, de forma direta (por se tratar de um rio de pequeno porte), com o emprego de uso de vara, anotação manual de dados em cadernetas de campo.

Os dados batimétricos foram providos de coletas de dados do Rio Cabaraquara, utilizando-se de uma embarcação de pequeno porte (Figura 18), uma vara rígida graduada de 10 em 10 centímetros, até 3,00 metros de comprimento (Figura 19, para a obtenção da profundidade da água em vários pontos do canal de navegação.

FIGURA 18 – MARINA DO CEBOLA, EMBARCAÇÃO UTILIZADA NO LEVANTAMENTO BATI-MÉTRICO.



FONTE: A Autora, 2022.

FIGURA 19 – REMO UTILIZADO COMO RÉGUA PARA MARCAÇÃO E COLETA DE DADOS.



FONTE: A Autora, 2022.

A coleta de dados seguiu-se o canal navegável do Rio Cabaraquara, partindo de início da Marina do Cebola, seguindo o trajeto até a desembocadura da Baía de Guaratuba (Figura 20) e retornando para a marina. A Figura 21 ilusta a identicação dos pontos coletados no Rio Cabaraquara.



FIGURA 20 – DESEMBOCADURA DO RIO CABARAQUARA COM A BAÍA DE GUARATUBA.

FONTE: A Autora, 2022.



FIGURA 21 – PONTOS DOS LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.

FONTE: A Autora, 2022.

A posição dos pontos onde os dados batimétricos foram coletados foram armazenados em aplicativo de dispositivo GPS, onde posteriormente, utilizou-se o sistema de coordenadas cartesianas UTM, figura 22 (UTM GeoMap¹).

¹ Aplicativo android, desenvolvido para coleta de dados relacionado a coordenadas, mapas, SIG e análise espacial.

FIGURA 22 – COLETA DE DADOS BATIMÉTRICOS REALIZADA NO DIA 23/07/2022.



FONTE: A Autora, 2022.

5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICA E MORFODINÂMICA

A análise dos resultados referentes ao modelo hidrodinâmico e morfodinâmico foi representada através de séries temporais relacionadas as varições de níveis de maré atuantes no local de estudo e mapas espaciais, indicando as velocidades de superfície e velocidade de fundo presentes no mesmo.

As séries temporais demonstram as varições de nível de maré (m) em um certo espaço de tempo (h) e são de extrema importância para a análise da simulação dos fluxos de alagamento e secamento das margens laterais. Neste condição, o fluxo normal é implicitamente calculado como uma função da posição da superfície livre e do talude da margem. O talude da margem (m) na direção normal à fronteira pode ser calculada pelo modelo a partir da topografia de fundo do domínio (ROSMAN, 2000).

No caso de canais com a presença de manguezais, o alagamento e o secamento só ocorrem no momento em que o nível da água estiver acima da cota da beira do banco do manguezal, Z_{alaga} , onde geralmente fica entre a cota do nível médio e a cota de preamar de maré de quadratura do local, como o esquema a seguir:



FIGURA 23 – ESQUEMA DO CONTORNO PERMEÁVEL TIPO BANCO DE MANGUEZAL.

FONTE: ROSMAN (2000).

A partir da cota de alagamento, o modelo considera uma planície de maré virtual para computar o volume de água alagando e secando na região. Neste trabalho, declarou-se para o modelo o valor de 1 metro de talude à partir da margem, na direção normal à fronteira. Essa cota de alagamento é o limite a partir do qual o mecanismo virtual de maré é ativado, fazendo com que o volume de água aportado para dentro do domínio seja contabilizado no balanço de massa. Foram estabelecidos três pontos na desembocadura do rio em encontro com a baía e outros três pontos, próximo ao início do canal de navegação, conforme mostra a Figura 24:



FIGURA 24 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DOS NÍVEIS.

FONTE: A Autora, 2022.

Na Figura 25 e na Figura 26 é possível analisar que, apenas condição de alagamento, tanto à direita, quanto à esquerda (de quem da Baía de Guaratuba olha para o Rio Cabaraquara) ocorre. Isso porque, a variação ocorre no sentido positivo da elevação do nível do mar. Nota-se ainda que, a varição tanto à direta, quanto à esquerda, possuem a mesma variação devido aos dados batimétricos obtidos para este trabalho e a reprodução imprecisa dos mesmos, sendo necessário um nível de detalhamento muito mais preciso para este estudo.



FONTE: A Autora, 2022.



FONTE: A Autora, 2022.

Já na análise das velocidades da corrente de superfície e do fundo, os resultados obtidos permitiram interpretar a origem dos principais padrões que podem gerar efeitos erosivos ou tendências de assoreamento.

Em regiões onde há à presença de sedimentos com diâmetros em torno de 0,2mm (0,0002 metros), ocorre o princípio de movimentação dos grãos de sedimentos, em velocidades

incidentes ao fundo em torno de 0,3 m/s, conforme ilustra a figura 27 (VAN RIJAN, 1993). Em outras palavras, para que este grão inicie seu processo de suspensão, é necessário a atuação de correntes de fundo de aproximadamente 0,35 m/s.





Nos resultados obtidos por meio do modelo hidrodinâmico, são demonstrada as velocidades de superfície de fundo (Figura 28) e velocidades de superfície média (Figura 29).

FONTE: Van Rijan (1993).



FIGURA 28 – VELOCIDADE DE SUPERFÍCIE DE FUNDO (M/S).

FONTE: A Autora, 2022.





FONTE: A Autora, 2022.

Pode-se observar que, a velocidade de superfície de fundo varia de 0 à 0,09 m/s, e a velocidade de superfície média chega em alguns pontos em torno de 0,4 m/s (esse valor se da devido a um "estouro" de velocidade presente na malha, não sendo tão válido) mas sua média fica em torno 0,136 m/s. O valor máximo observado da corrente de superfície durante o período analisado foi de 0,07 m/s, conforme mostra a Figura **??**, demonstrando que, devido a baixa velocidade, a região possui pouca capacidade de promover transporte de sedimentos, sendo

assim, propício a ocorrer a tendência de assoreamento com o decorrer dos anos.

Através dos resultados de corrente obtidos, é possível notar que a principal componente geradora do escoamento é a varição de maré que incide sob a Baía de Guaratuba e adentra ao Rio Cabaraquara. Na Figura 30 é representada o fluxo do escoamento em maré vazante, indicando a direção e sentido do mesmo. Esse escoamento, junto a configuração geométrica da região determina as características do padrão de circulação encontrado. Os valores máximos de escoamento ocorrem onde há a presença de mangue, conforme ilustra a Figura 31. Isso se dá devido a maior volume de água armazenado nas regiões de alagamento, quanto maior o volume de água a ser deslocado, maior as velocidades de escoamento.

FIGURA 30 – VELOCIDADE MÉDIA NA COLUNA D'ÁGUA E DIREÇÃO RESIDUAL (M/S).



FONTE: A Autora, 2022.



FIGURA 31 – VELOCIDADE MÁXIMA (M/S).

FONTE: A Autora, 2022.

Na análise morfodinâmica do Rio Cabaraquara, foram obtidos resultados significativos a respeito do *"bed shear strass"* (atrito cisalhante de fundo), onde as variçãoes médias obtidos variam na escala de 0 a 0.5 N/m² (Figura 32 e Figura 33). Estes valores demonstram estar coerentes com referências bibliográficas para estudos utilizando sedimentos finos e parcelas de lama, onde o autor Van Rijan (1993) relacionou o atrito cisalhante de fundo de diversas regiões (e diferentes granulometrias com parcelas de lama), e identificaram que a quantidade de material em suspensão na água altera as relações do *Critical shear stress for surface erosion (N/m²)*. Ou seja, quanto mais material em suspensão em uma solução "viscosa", existe a tendência de maior resistência a erosão, mantendo a agregação das partículas no fundo.

Em contrapartida, quanto maior o atrito cisalhante de fundo, maior será a velocidade e com isso, o sedimento tende e erodir no fundo. Porém, como a região de estudo possui alta concentração de material em suspensão (por consequência do sistema manguezal), para promover transporte de sedimento na região seria necessário valores de *bed shear stress* entre 0.6 e 1 N/m², justificando o fato da região possuir tendência ao assoreamento, visto que o Rio Cabaraquara é descrito com profundidades rasas e superfície de fundos lamosos, sob baixas condições de energia hidrodinâmica provindas da nascente do rio. As feições destas regiões apresentam características deposicionais, possivelmente derivados de uma predominância da deposição dos sedimentos finos em suspensão, configurando-se como planícies de marés nas margens da baía e baixios nas áreas protegidas das correntes de maré vazante.



FIGURA 32 – ATRITO CISALHANTE COM O FUNDO MÉDIO (N/M²).

FONTE: A Autora, 2022.

FIGURA 33 – BED SHEAR STRASS MÉDIO NOS PONTOS DE INTERESSE (N/M).



FONTE: A Autora, 2022.

6 CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados alcançados, pode-se concluir que metodologia aplicada no presente estudo, onde emprega o uso modelos hidrodinâmicos costeiros para avaliar a influência das áreas alagáveis presentes na hidrodinâmica do Rio Cabaraquara, foi um objetivo concluído neste trabalho.

A aplicação dos modelo TELEMAC-3D e SISYPHE demonstraram resultados satisfatórios e promissores, sendo útil na orientação de investigações futuras, bem como, pode ser aplicados à gestão de sistemas estuarinos com planícies de alagamento e secamento.

Para a análise dos processos hidrodinâmicos, morfodinâmicos e de transporte de sedimentos, foram avaliados a variação do nível do mar, a direção e intensidade da velocidade residual, bem como, os pontos onde ocorrem a maior incidência do atrito com o fundo, identificando a tendência de assoreamento, visto que o sedimento não é transportado com a variação da maré.

Dentro da escala temporal do estudo, pode-se afirmar que a dinâmica da região é controlada principalmente pela descarga fluvial, nas quais, condicionam em trocas de água doce do Rio Cabaraquara e a água salobra da Baía de Guaratuba, demonstrando que o campo média de elevação da superfície não ultrapassa X metros.

Entretanto, deve-se também, levar em consideração que a Baía de Guaratuba, por se tratar de um sistema estuarino, possui características bastante especiais, em termos de escalas espaciais, dinâmica de marés, vazão fluvial, dinâmica sedimentar, o que torna o processo de calibração e validação do modelo um fator complicador. As dificuldades encontradas no decorrer do estudo devem-se principalmente à carência de dados, uma vez que foram coletados de maneira manual, acabam que desfavorecendo os resultados finais e além disso, o desconhecimento de alguns processos físicos atuantes na região, visto que o local abordado é uma região com a presença mangue, atuação das forçantes da baía e do córrego do Rio Cabaraquara.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão do presente trabalho, sugere-se a obtenção detalhada dos dados batimétricos do Rio Cabaraquara, visto que a representação do domínio a ser modelado depende diretamente deste fator e influencia de forma significante na obtenção dos resultados.

Recomenda-se também, um período de simulação mais longa, visto que nesse trabalho foi utilizado apenas o período de um mês, não expressando de forma considerável as questões climatológicas, como o vento, por exemplo. Para trabalhos futuros, é aconselhável utilizar um período maior de meses, ou se possível anos, para realizar a obtenção de resultados mais significativos em termos de cobertura temporal e análise de eventos extremos.

Com a análise e resultados obtidos referente à hidrodinâmica do canal de navegação, é possível desenvolver novos estudos, visando a melhoria da navegabilidade do mesmo, como por exemplo, um estudo de viabilididade de aplicação de dragagem e limpeza do canal, no qual, possibilita a a navegação de embarcações maiores, facilitando o acesso a Baía de Guaratuba.

REFERÊNCIAS

AEROENGADMIN. Levantamento topográfico: Importância e aplicações. [S.I.: s.n.], set. 2019. Citado 1 vez na página 24.

ANGULO, R. J. **Geologia da Planície Costeira do Estado do Paraná**. 1992. F. 1–334. Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 29.

ANGULO, R. J. Variações na configuração da linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas. [S.I.], 1993. P. 52–72. Citado 1 vez na página 29.

ANGULO, R.J.; SOUZA, M.C.; ARAÚJO, A.D. Morfodinâmica Costeira: subsídios à ocupação. In: NEGRELLE; Raquel R. B.; LIMA, Renato Eugenio de (Ed.), p. 183–216. Citado 1 vez na página 15.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 13133**: Execução de Levantamento Topográfico. Rio de Janeiro, maio 2021. P. 35. Citado 1 vez na página 24.

BARROS, G. L. M. **Navegar é fácil**. 14. ed. [S.I.: s.n.], 2003. Citado 1 vez na página 25. BECKER, Johannes et al. Estimating source terms for far field dredge plume modelling. **Journal of Environmental Management**, Elsevier Ltd, v. 149, p. 282–293, 2015. ISSN 10958630. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.10.022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.022. Citado 1 vez na página 27.

BIGARELLA, J. J. et al. A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: um problema de segurança ambiental e nacional : contribuições à geografia, geologia e ecologia regional. Governo do. [S.I.: s.n.], 1978. P. 248. Citado 1 vez na página 15.

BRANDINI, N. **BIOGEOQUÍMICA DA BAÍA DE GUARATUBA, PARANÁ, BRASIL: Origem, metabolismo, balanço de massa e destino da matéria biogênica.** 2008. F. 1–260. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE. Citado 1 vez na página 28.

CARMERON, W. M.; PRITCHARD, D. W. Estuaries. In: The sea - Ideas and Observation on Progress in the Study of the Sea, M. N. Hill. [S.I.], 1963. Citado 1 vez na página 23.

CHAVES, Paulo de Tarso da Cunha; CORRÊA, Marco Fábio Maia. Composição ictiofaunística da área de manguezal da Baía de Guaratuba, Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 15, n. 1, p. 195–202, 1998. ISSN 0101-8175. DOI: 10.1590/S0101-81751998000100017. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci%7B%5C_%7Darttext%7B%5C&%7Dpid=S0101-81751998000100017%7B%5C&%7DIng=pt%7B%5C&%7DtIng=pt. Citado 1 vez na página 28.

DANIEL, R R. The International Geosphere–Biosphere Programme - A study of global change. **Current Science**, Temporary Publisher, v. 59, p. 134–138, 3 1990. ISSN 00113891. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/24092950. Citado 1 vez na página 15.

DESOMBRE, J.; LANG, P. Telemac Modelling System: TELEMAC-3D software (Release 7.1). [S.I.]: EDF RD, 2016. P. -108. Citado 1 vez na página 32.

DUKE, Norman C.; BALL, Marilyn C.; ELLISON, Joanna C. Factors Influencing Biodiversity and Distributional Gradients in Mangroves. **Global Ecology and Biogeography Letters**, v. 7, p. 27, 1 jan. 1998. ISSN 09607447. DOI: 10.2307/2997695. Citado 1 vez na página 21.

DYER, R. K. **Estuaries: A Physical Introduction**. 2. ed. [S.I.]: Wiley, 1998. P. 1–210. Citado 1 vez na página 16.

FAIRBRIDGE, R. W. The estuary: Its definition and geodynamic cycle, p. 1–36, 1980. Citado 0 vez na página 24.

FAO, FAO Forestry Paper. The world's mangroves 1980-2005. A thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005. **Forest Economics and Policy Div.**, p. 1–77, 153 2008. Citado 1 vez na página 21.

FERNANDES, E. H. Modelling the hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil. In. Citado 1 vez na página 31.

FILHO, Pedro Walfir Martins Souza. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, p. 427–435, 4 dez. 2005. ISSN 0102-261X. DOI: 10.1590/S0102-261X2005000400006. Citado 1 vez na página 27.

GOUVEIA SOUZA, Célia Regina de. **A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil**. [S.I.: s.n.], 2009. P. 17–37. Citado 0 vez na página 19.

GUIMARÃES, José T.F. et al. Model of wetland development of the Amapá coast during the late Holocene. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 82, p. 451–465, 2 jun. 2010. ISSN 0001-3765. DOI: 10.1590/S0001-37652010000200021. Citado 1 vez na página 27.

HALLEGATTE, Stephane et al. Future flood losses in major coastal cities. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 802–806, 9 2013. ISSN 1758-6798. DOI: 10.1038/nclimate1979. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nclimate1979. Citado 1 vez na página 16. HANSON, Susan et al. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. **Climatic Change**, v. 104, p. 89–111, 1 2011. ISSN 1573-1480. DOI: 10.1007/s10584-010-9977-4. Disponível em:

https://doi.org/10.1007/s10584-010-9977-4. Citado 1 vez na página 15.

HERVOUET, J. M. Hydrodynamics of free surface: modeling with the finite element method. [S.I.: s.n.], 2007. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil. [S.I.]: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2011. P. 1–177. Citado 1 vez na página 15.

IRITANI, Mara Akie. **Modelação Matemática Tridimensional para a Proteção das Captações de Água Subterrânea**. Fev. 1999. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/T.44.1999.tde-16082013-125326. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-16082013-125326/. Citado 1 vez na página 27.

JACOBI, H. **Sobre a distribuição da salinidade e do pH na Baía de Guaratuba**. v. 10. [S.I.: s.n.], 1953. P. 3–35. Citado 1 vez na página 28.

JACOUB, G. et al. Offshore sandbank morphodynamics modelling with sea level rise. In 2nd IMA International Conference on Flood Risk Assessment, p. 1–10, 2007. Citado 1 vez na página 34.

KANTEK, Raphael Telles; SAUTTER, Klaus Dieter; MICHALISZYN, Mário Sérgio. Impactos ambientais na Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaratuba, Paraná, Brasil, sob o ponto de vista de moradores tradicionais. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 2, p. 39–56, ago. 2009. ISSN 1982-4513. DOI: 10.1590/S1982-45132009000200004. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci%7B%5C_%7Darttext%7B%5C&%7Dpid=S1982-45132009000200004%7B%5C&%7Dlng=pt%7B%5C&%7Dtlng=pt. Citado 1 vez na página 16.

KIRINUS, E. P. Estudo Numérico de Conversão da Energia Cinética das Correntes Marinhas em Energia Elétrica na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira. 2017. F. 1–259. Universidade Federal do Rio Grande. Citado 2 vezes nas páginas 34–38.

KIRINUS, E. P. et al. The Contribution of Waves in Mixing Processes of the Patos Lagoon Plume. **International Journal of Geosciences**, v. 03, p. 1019–1026, 05 2012. ISSN 2156-8359. DOI: 10.4236/ijg.2012.35102. Citado 1 vez na página 31.

KJERFVE, B. Manual for Investigation of Hydrological Processes in Mangrove **Ecosystems**. [S.I.]: University of South Carolina, abr. 1990. P. 1–77. Citado 1 vez na página 16.

KJERFVE, Bjorn et al. Morpkodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. **Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Function**, p. 479–532, 2002. Citado 1 vez na página 22.

KRUG, L. A.; NOERNBERG, M. A. O sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na Baía das Laranjeiras, Paranaguá - PR.
Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, p. 101–105, 2007. ISSN 0102-261X. DOI: 10.1590/S0102-261X2007000500010. Citado 1 vez na página 26.

L. B. MIRANDA, B. M. Castro; BJÖRN, K. **Princípios de Oceanografia Fisica de Estuários**. [S.I.: s.n.], jan. 2002. P. 414. Citado 2 vezes nas páginas 15, 16.

LACERDA, Luiz Drude de; MENEZES, Marcelo Oliveira Teles de;

MOLISANI, Maurício Mussi. Changes in mangrove extension at the Pacoti River estuary, CE, NE Brazil due to regional environmental changes between 1958 and 2004. **Biota Neotropica**, v. 7, p. 67–72, 3 2007. ISSN 1676-0603. DOI:

10.1590/S1676-06032007000300007. Citado 1 vez na página 27.

LARA, R. J.; COHEN, M. C. L. **Sensoriamento Remoto**. 1^ª ed. [S.I.]: Fundação Rio Bacanga, 2003. P. 13–30. Citado 1 vez na página 27.

MARONE, E. et al. Hydrodynamic of Guaratuba Bay, PR, Brazil. **Journal of Coastal Research**, p. 1879–1883, 2006. Citado 1 vez na página 29.

MARONE, Eduardo et al. Hydrodynamic of Guaratuba Bay-PR, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 39, p. 1879–1883, 2004. Citado 1 vez na página 28.

MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H.; MOLLER, O. O. Straining and advection contributions to the mixing process of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. c06019, C6 jun. 2010a. ISSN 0148-0227. DOI: 10.1029/2009JC005653. Citado 1 vez na página 31.

MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H.; MONTEIRO, I. O. et al. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 556–571, 3 mar. 2009. ISSN 02784343. DOI: 10.1016/j.csr.2008.09.022. Citado 1 vez na página 31.

MARQUES, W. C.; FERNANDES, E. H.; MORAES, B. C. et al. Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 115, 2010jc006190, C10 out. 2010b. ISSN 0148-0227. DOI: 10.1029/2010JC006190. Citado 1 vez na página 31.

MATHIAS, B.; BOND, B. **Vela e Prancha para todos**. Ao livro técnico. [S.l.: s.n.], 1983. P. 88. Citado 1 vez na página 25. MAZDA, Y.; KANAZAWA, N.; WOLANSKI, E. Tidal asymmetry in mangrove creeks. **Hydrobiologia**, v. 295, p. 51–58, 1-3 jan. 1995. ISSN 0018-8158. DOI: 10.1007/BF00029110. Citado 1 vez na página 23.

MIGUEL, L. A. Formation, évolution et transformationd'un système agraire dans le sud du Brésil (littoral nord del'État du Paraná). Une paysannerie face à une politique deprotection de l'environnement: "Cronique d'une mortannoncée?" 1997. F. 313. Tese (Doutorado) – Institut National Agronomique. Citado 1 vez na página 15.

MILLIMAN, John D. et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 4, n. 1-2, p. 37–45, 1985. ISSN 02784343. DOI: 10.1016/0278-4343(85)90020-2. Citado 1 vez na página 27.

MIRANDA, L. B. **Cinemática e dinâmica de estuários**. [S.I.]: São Paulo., 1996. P. 1–300. Citado 1 vez na página 16.

MUEHE, Dieter. Brazilian coastal vulnerability to climate change. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, p. 173–183, 2010. Citado 1 vez na página 20.

NASCIMENTO, Wilson R. et al. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery.

Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 117, p. 83–93, jan. 2013. ISSN 02727714. DOI: 10.1016/j.ecss.2012.10.005. Citado 1 vez na página 27.

PHAM, C. T.; JOLY, A. TELEMAC MODELLING SYSTEM: TELEMAC-3D Software - OPERATING MANUAL. [S.I.], 2016. Citado 1 vez na página 33.

PRITCHAD, Donald W. What is an estuary: Physical Viewpoint. [S.I.: s.n.], 1967. P. 3–5. Citado 2 vezes nas páginas 16, 23.

RIBEIRO, M.A.T.S.B. Metais pesados (AI, Fe, Mn, Cr, Ni, Ti) no sedimento superficial do estuário de Guaratuba. [S.I.: s.n.], 2006. P. 1–108. Citado 1 vez na página 29.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBAHIA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental.** [S.I.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000. P. 1–426. Citado 1 vezes nas páginas 46, 47.

SALAMUNI, R.; BIGARELLA, J.J. Notas Complementares à planta geológica provisória da Baía de Guaratuba (PR). v. 8. [S.I.: s.n.], 1962. P. 1–6. Citado 1 vez na página 29.

SHEARMAN, Philip L. Recent Change in the Extent of Mangroves in the Northern Gulf of Papua, Papua New Guinea. **AMBIO**, v. 39, p. 181–189, 2 mar. 2010. ISSN 0044-7447. DOI: 10.1007/s13280-010-0025-4. Citado 1 vez na página 22.

SILVA BEZERRA, Denílson da; AMARAL, Silvana; KAMPEL, Milton. Impactos da Elevação do Nível Médio do Mar sobre o Ecossistema Manguezal: A Contribuição do Sensoriamento Remoto e Modelos Computacionais. In. Citado 1 vez na página 27.

SOARES, R. J.; ANGULO, G. C.; LESSA, R. C. Roteiro da excursão ao litoral do Estado do Paraná: Morfodinâmica de ambientes atuais, evolução da planície durante o quaternário e problemas de erosão costeira. In: p. 290–294. Citado 1 vez na página 28.

SPALDING, M; KAINUMA, M.; COLLINS, L. **A preliminary study of buoyancy behaviour in Avicennia marina propagules.** 1st ed. [S.I.]: Routledge, set. 2010. P. 1–336. ISBN 9781136530968. DOI: 10.4324/9781849776608. Citado 2 vezes nas páginas 21–23.

SPALDING, M.; BLASCO, F.; FIEL, CD. World Atlas of Mangroves. The International Society for Mangrove Ecosystems. [S.I.]: Routledge, 1997. P. 1–178. ISBN 9781136530968. DOI: 10.4324/9781849776608. Citado 0 vez na página 22.

STRUVE, J.; FALCONER, R.A.; WU, Y. Influence of model mangrove trees on the hydrodynamics in a flume. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 58, p. 163–171, 1 set. 2003. ISSN 02727714. DOI: 10.1016/S0272-7714(03)00072-6. Citado 1 vez na página 27.

SYVITSKI, James P M et al. Distributary channels and their impact on sediment dispersal. **Marine Geology**, v. 222-223, n. 1-4, p. 75–94, 2005. ISSN 00253227. DOI: 10.1016/j.margeo.2005.06.030. Citado 1 vez na página 27.

TASSI, P. Numerical modelling if river processes: Flow and river bed deformation. 2007. F. 135. PhD Thesis – University of Twente. Citado 1 vez na página 34.

TOMLINSON, P Barry. **The Botany of Mangroves**. 2. ed. [S.I.]: Cambridge University Press, 2016. ISBN 9781107080676. DOI: DOI:10.1017/CB09781139946575. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/books/botany-of-

mangroves/36A4F5E38510D0161443DB770E81BB7F. Citado 1 vez na página 21.

VAN RIJAN, L. C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. [S.I.: s.n.], 1993. Citado 2 vezes nas páginas 49, 52.

VILLARET, C. A large scale morphodynamic process-based model of the Gironde estuary. In. DOI: 10.3990/2.172. Citado 1 vez na página 34.

VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO, V. E. Carta sedimentólogica da plataforma continental brasileira: área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, 3 set. 2005. ISSN 0102-261X. DOI: 10.1590/S0102-261X2005000300003. Citado 1 vez na página 19.

WANG, Yonghong et al. Long-term (1842-2006) morphological change and equilibrium state of the Changjiang (Yangtze) Estuary, China. **Continental Shelf Research**, Elsevier, v. 56, p. 71–81, 2013. ISSN 02784343. DOI: 10.1016/j.csr.2013.02.006. Citado 1 vez na página 27.

WARNER, John C. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. c05001, C5 2005. ISSN 0148-0227. DOI: 10.1029/2004JC002691. Citado 1 vez na página 17.

WINTERWERP, Johan C; WANG, Zheng Bing. Man-induced regime shifts in small estuaries - I: Theory. **Ocean Dynamics**, v. 63, n. 11-12, p. 1279–1292, 2013. ISSN 16167341. DOI: 10.1007/s10236-013-0662-9. Citado 1 vez na página 17.

WOLANSKI, E. **Estuarine Ecohydrology**. 1st ed. [S.I.]: Australian Institute of Science, 2007. Citado 1 vez na página 22.

ZEM, Rafaela Cristine. Dinâmica Sedimentar da Baía de Guaratuba - PR. Pontal do Paraná, 2005. Citado 1 vez na página 29.

ZHAO, Jie et al. An analysis on half century morphological changes in the Changjiang Estuary: Spatial variability under natural processes and human intervention. **Journal of Marine Systems**, Elsevier, v. 181, May 2017, p. 25–36, 2018. ISSN 09247963. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2018.01.007. Citado 1 vez na página 27.

ANEXO 1 – LEVANTAMENTO BATRIMÉTRICO DO RIO CABARAQUARA

Ponto	Hora	Profundidade	Coordenadas geográficas	
Fonto	пога	coletada (m)	Latitude (X)	Longitude (Y)
P00	14:38.40	1,00	-25.737151818341354	-48.574092127382755
P01	14:44:21	0,90	-25.837429136106800	-48.5737669095397
P02	14:46:26	0,65	-25.837293947549377	-48.573876209557056
P03	14:46:57	0,75	-25.837245665884268	-48.57397444546223
P04	14:47:39	0,70	-25.83717897680195	-48.574077039957054
P05	14:48:27	0,80	-25.83722303384696	-48.57432983815671
P06	14:49:26	0,83	-25.83711409824687	-48.5762923973799
P07	14:50:34	0,70	-25.837060988333448	-48.574820682406425
P08	14:51:48	0,90	-25.83695567371872	-48.57522837817669
P09	14:53:17	0,92	-25.836874198164498	-48.57553984969854
P10	14:56:21	0,90	-25.83674594949325	-48.57592038810254
P11	14:57:47	0,62	-25.836653610363932	-48.57640251517295
P12	14:58:43	0,98	-25.836916444755172	-48.576549366116524
P13	14:59:50	1,05	-25.836887777427425	-48.5767300799489
P14	15:00:44	1,02	-25.836867559413157	-48.57691783457995
P15	15:01:16	0,79	-25.836818674050967	-48.57702814042568
P16	15:02:07	0,80	-25.83667382841476	-48.57723031193018
P16	15:02:42	1,05	-25.83665964560334	-48.57745226472616
P17	15:03:52	0,79	-25.836643048694217	-48.57744723558425
P18	15:04:57	0,75	-25.836653610363932	-48.57750121504068
P19	15:08:27	0,42	-25.836810224727053	-48.577708080410964
P20	15:10:04	0,75	-25.8366635685088	-48.577413372695446
P21	15:10:53	0,78	-25.836636108167895	-48.57741370797157
P21	15:11:29	0,85	-25.836799964832927	-48.57738755643368
P22	15:11:51	1,03	-25.836695253509617	-48.57723064720631
P23	15:12:18	0,87	-25.83671999798054	-48.57715219259262
P24	15:12:46	0,82	-25.83673267197585	-48.57709217816591
P25	15:13:12	1,03	-25836785782036625	-48.577021434903145
P26	15:13:31	1,09	-25.836837986789057	-48.57696477323771
P27	15:14:10	1,05	-25.83684673787247	-48.57688833028078
P28	15:14:27	1,19	-25.83686876645889	-48.57682731002569
P29	15:14:53	0,99	-25.836883251006626	-48.576731756329536
P30	15:15:20	1,02	-25.83683828855057	-48.57660200446844
P31	15:15:41	0,75	-25.83679694721684	-48.576523549854755
P32	15:16:22	0,69	-25.83674293187582	-48.57639145106077
P33	15:17:01	0,60	-25.836667189652186	.48.57620269060135
P34	15:17:24	0,98	-25.836627357068895	-48.57614066451788
P35	15:17:45	0,92	-25.83665210155403	-48.5760598629713
P36	15:18:00	1,00	-25.836692537652738	-48.57600990682841
P37	15:18:26	1,02	-25.836774013332036	-48.575878478586674
P38	15:18:42	0,95	-25.836795136647133	-48.575820811092846
P39	15:18:58	0,92	-25.83680056835613	-48.57575375586748
P40	15:19:13	0,89	-25.836805094780093	-48.57568301260471

	P41	15:19:51	0,83	-25.36852773102034	-48.57547044754029
	P42	15:20:10	0,82	-25.836898942598012	-48.57538294047117
	P43	15:20:38	0,80	-25.83689351089353	-48.57526056468487
	P45	15:21:01	0,89	-25.836917350039094	-48.575187139213085
	P46	15:21:25	0,95	-25.836962915987474	-48.57510298490524
	P47	15:21:46	0,80	-25.8369792110906	-48.57502955943346
	P48	15:22:00	0,79	-25.836978004046003	-48574957475066185
	P49	15:22:15	0,70	-25.836996411474782	-48.574896454811096
	P50	15:22:40	0,76	25.83701632770597	-48.57478078454733
	P51	15:22:53	0,73	-25.837057367202124	-48.57472211122513
	P53	15:23:11	0,79	-25.837086939771392	-48.574674502015114
	P54	15:23:26	0,83	-25.837121944027505	-48.57462052255869
	P55	15:23:46	0,78	-25.83714759369138	-48.5745457559824
	P56	15:24:03	0,83	-25.83717746799874	-48.57449948787689
	P57	15:24:25	0,81	-25.837221525044328	-48.57442606240512
	P58	15:24:37	0,80	-25.83723118138089	-48.574383147060864
	P59	15:24:58	0,94	-25.837225749691665	-48.574296310544014
	P60	15:25:13	0,96	-25.83719466835411	-48.57428030781746
	P61	15:25:25	1,02	-25.83717897680195	-48.5742299258709
	P62	15:25:35	0,96	-25.83716660461511	-48.574207462370396
	P00	15:26:00	0,97	-25.737151818341354	-48.574092127382755