



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Ana Flávia Caetano Bastos

ESTUDO DAS CORRENTES LONGITUDINAIS NA PRAIA DO CAMPECHE
POR MEIO DE BATIMETRIA INVERSA E MODELAGEM NUMÉRICA

Florianópolis

2022

Ana Flávia Caetano Bastos

ESTUDO DAS CORRENTES LONGITUDINAIS NA PRAIA DO CAMPECHE
POR MEIO DE BATIMETRIA INVERSA E MODELAGEM NUMÉRICA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Oceanografia da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Oceanografia.

Orientador: Prof. Pedro de Souza Pereira, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bastos, Ana Flávia Caetano

Estudo das Correntes Longitudinais na Praia do Campeche
por meio de Batimetria Inversa e Modelagem Numérica / Ana
Flávia Caetano Bastos ; orientador, Pedro de Souza
Pereira, 2022.

75 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas,
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis,
2022.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Batimetria Remota. 3. Modelagem
numérica. 4. Correntes Longitudinais. I. Pereira, Pedro de
Souza . II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. III. Título.

Ana Flávia Caetano Bastos
Nome completo do (a) autor(a)

**Estudo das Correntes Longitudinais na Praia do Campeche por meio de
Batimetria Inversa e Modelagem Numérica**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 16 de dezembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Pedro de Souza Pereira, Dr.(a)
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Mauro Michelena Andrade, Dr.(a)
Instituição Universidade do Vale do Itajaí

Prof.(a) Antonio Henrique da Fontoura Klein, Dr.(a)
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Oceanografia.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.(a) Pedro de Souza Pereira, Dr.(a)
Orientador(a)

Florianópolis, 2022.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer meu orientador Pedro, que na convivência diária nestes quase três últimos anos me ajudou muito. Me dando novas ideias de como continuar a pesquisa, corrigindo meus erros e sempre me incentivando em buscar mais conhecimento.

Ao professor Mauro Michelena por disponibilizar o equipamento Nortek (ADCP) durante o experimento a campo além de participar ativamente do campo feito para coleta dos dados utilizados no presente trabalho.

Ao professor Pedro Guimãraes por auxiliar no entendimento do SWASH, tirando todas as dúvidas e se disponibilizando toda sexta-feira para reuniões.

A todos os alunos, técnicos e professores que coletaram os dados utilizados neste trabalho, sem eles esse trabalho não teria sido possível.

Aos meus pais, que sempre me ajudaram, aguentaram os meus surtos e me deram forças para continuar me apoiando incondicionalmente! Sem eles esse trabalho não existiria!

Ao meu irmão David e a Maria Helena, por me acalmarem e me incentivarem. Sempre dando uma nova perspectiva e me passando muita calma.

A Maria Clara por ser a mais nova integrante dessa família e a coisa mais fofa, linda e gostosa desse mundo.

A minha tia Yvone por todo incentivo, reza e energia positiva que uma pessoa pode oferecer.

Muito obrigada a todos os amigos feitos ao longo desses últimos anos, Mariana, Pedro, Rafaela, Luana, Mario. Em especial, a Juliana por estar sempre disposta a ajudar e debater ideias sobre as configurações do modelo SWASH.

RESUMO

A caracterização e monitoramento de praias arenosas é uma tarefa complexa devido sua alta dinâmica, envolvendo diferentes escalas temporais e espaciais. Outro aspecto a ser considerado no processo de caracterização está associado à obtenção de dados (custos e acessibilidade). No presente estudo, tem-se como hipótese de pesquisa ser possível compreender os processos costeiros, como as correntes longitudinais em praias arenosas, através do acoplamento entre batimetria inversa e o uso de modelo numéricos. Foram desenvolvidas 8 simulações, divididas em dois cenários utilizando o modelo SWASH. A batimetria obtida por imagens coletadas por VANT apresenta resultados consistentes, permitindo sua utilização como variável de entrada no SWASH. Os resultados estatísticos analisados mostram que o modelo que considera os dados batimétricos obtidos por imagens coletadas por VANT; velocidade inicial das correntes e o espectro de ondas apresenta resultados mais próximos a realidade local.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, SWASH, VANTs

ABSTRACT

The characterization and monitoring of sandy beaches is a complex task. This type of environment is highly dynamical covering changes in different temporal and spatial scales. Another aspect to be considered in the characterization process is associated with obtaining data (costs and accessibility). Therefore, this project hypothesizes the possibility of understanding coastal processes, such as alongshore currents on sandy beaches, through bathymetry acquired via remote sensing and the use of numerical models. Eight simulations were developed using SWASH. The bathymetry obtained from images collected by UAV presents consistent results, meaning it's a valid input variable in SWASH. The statistical results analyzed show that the model that considers the bathymetric data obtained by images collected by UAV; initial velocity of the currents and the wave spectrum presents better results when compared to the collected data.

Keywords: Remote Sensing, SWASH, UAVs

MATERIAL DE DIVULGAÇÃO

Defesa de Dissertação

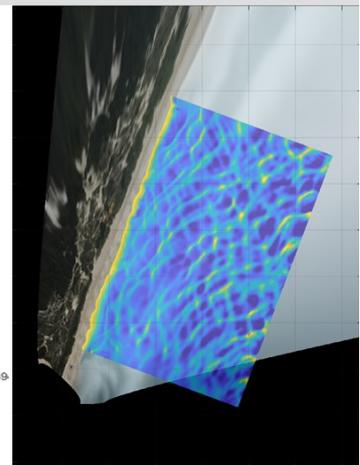
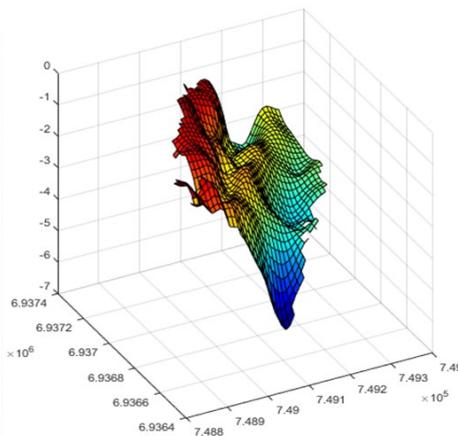
"Estudo das Correntes Longitudinais na Praia do Campeche por meio de Batimetria Inversa e Modelagem Numérica"

Aluna: Ana Flávia Caetano Bastos
Orientador: Pedro de Souza Pereira



Data: 16/12/2022 Horário: 09:00
Local: Videoconferência (Youtube)

Resumo: Este estudo apresenta o comportamento de processos costeiros na zona de surfe em uma praia com bancos arenosos por meio do acoplamento entre ferramentas de modelagem numérica e batimetria inversa. Foram utilizados o algoritmo cBathy e o modelo SWASH para calcular as correntes longitudinais na praia do Campeche. Os modelos foram avaliados estaticamente para determinar a influencia da batimetria sobre os modelos.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zonas hidrodinâmica e morfológica típica em praia arenosa oceânica	9
Figura 2. Diagrama esquemático de ondas se aproximando com um ângulo oblíquo em relação à linha de costa.....	10
Figura 3. Mapa de localização da área de estudo. (a) Ilha de Santa Catarina e estado de Santa Catarina (inset); (b) Praia do Campeche.....	22
Figura 4. Fluxograma da metodologia.....	24
Figura 5. Receptor GNSS RTK utilizado para a coleta de pontos de controle.....	25
Figura 6. Veículo aéreo não tripulado utilizado na captura dos dados coletados em campo: modelo Mavic PRO da DJI.....	26
Figura 7. Perfilador Acústico tipo Doppler da Nortek modelo Aquadopp 1MHz, utilizado em campo.....	28
Figura 8. Derivador, utilizado no experimento. (a) Desenho esquemático. (b) Derivador em funcionamento na prática.....	29
Figura 9. Imagens utilizadas para calibração da câmera.....	31
Figura 10. Grade utilizado para calibração.....	32
Figura 11. Imagem com cantos extraídos pelo algoritmo de calibração.....	32
Figura 12. Exemplo do georreferenciamento das imagens, cruces coloridas, pontos selecionados na imagem e círculos vermelhos representam as coordenadas no mundo real...	35
Figura 13. <i>Pixel Instrument Matrix</i>	36
Figura 14. Grade do Swash sobre imagem Timex	40
Figura 15. Espectro direcional utilizado para cada simulação. Primeira simulação (08:00hr); (b) Segunda simulação (09:00hr); (c) Terceira simulação (10:00hr); (d) Quarta simulação (11:30min).....	41
Figura 16. Matriz da velocidade inicial inserida no modelo.....	44
Figura 17. Exemplo de imagem oblíqua extraída do vídeo da área de estudo.....	46
Figura 18. Imagem de longa exposição retificada para às 9:00 horas da manhã	47
Figura 19. (a) Batimetria determinada utilizando o cBathy e (b) Erro máximo de cada elemento da batimetria calculada utilizando cBathy.....	48
Figura 20. Resultados da elevação da superfície no último passo de tempo e da porcentagem média da probabilidade de quebra de onda, para primeira simulação (a) e (b) e para a segunda simulação ((c) e (d)).....	52

<p>Figura 21. Resultados da elevação da superfície no último passo de tempo e da porcentagem média da probabilidade de quebra de onda, para terceira simulação (a) e (b) e para a quarta simulação ((c) e (d)).....</p>	54
<p>Figura 22. Trajeto do derivador em vermelho, pontos selecionados para análise em verde</p>	55
<p>Figura 23. Exemplos de direção dos dados de corrente oriundos do modelo (setas azuis) e da trajetória do derivador (vermelho). (a) Primeira simulação. (b) Segunda simulação. (c) Terceira simulação. (d) Quarta simulação.</p>	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultado da Calibração	33
Tabela 2. Tempo de cada simulação	39
Tabela 3. Comparação do valor de altura significativa calculado pelo modelo e o valor adquirido pelo ADCP e o nível do mar inicial (T=0 após 5 minutos) para cada simulação	42
Tabela 4. Velocidade da corrente longitudinal obtida pelo derivador e modelo numérico (Cenário 1 e Cenário 2) para os 6 pontos analisados	50
Tabela 5. Resultados da análise estatística do modelo. Destacado em vermelho o menor índice de dispersão, indicando o modelo com melhor desempenho.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP Acoustic Doppler Current Profiler

ADV Accoustic Doppler Velocimeter

CRABs Coastal Research Amphibious Buggy

GNSS Global Navigation Satellite System

GCP Ground Control Point

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LIDAR Light Detection and Ranging

PIV Particle Image Velocimetry

VANT Veiculo Aéreo Não Tripulado

WAM WAve Model

SWASH Simulating WAves till SHore

SUMÁRIO

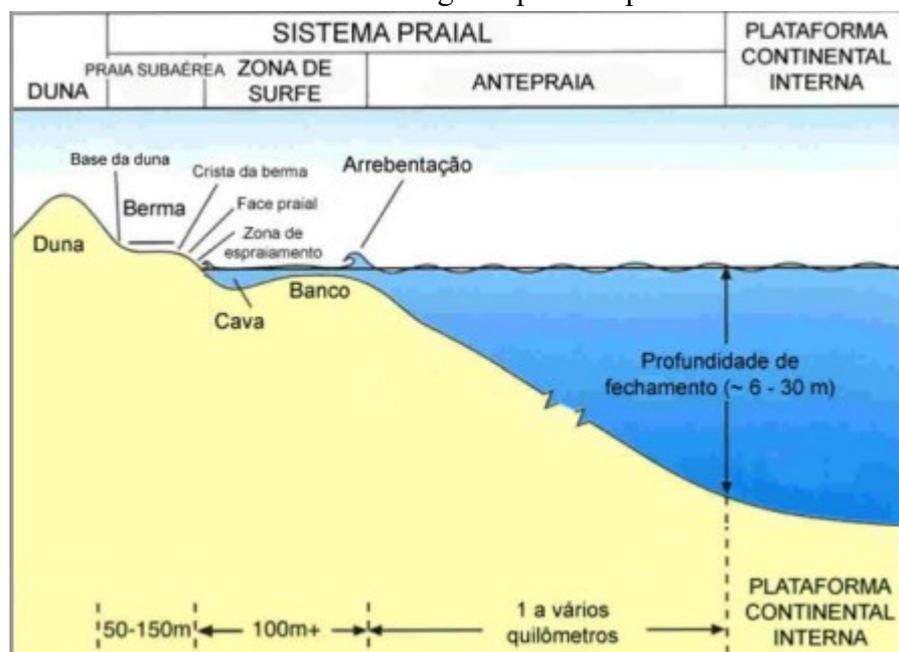
1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVOS	21
2.1.	OBJETIVO GERAL	21
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3.	METODOLOGIA.....	22
3.1.	ÁREA DE ESTUDO	22
3.2.	ETAPAS METODOLÓGICAS	23
3.3.	COLETA DE DADOS	25
3.4.	GERAÇÃO DA BATIMETRIA INVERSA	30
3.4.1.	Calibração da câmera.....	30
3.4.2.	Retificação das Imagens.....	33
3.4.3.	Algoritmo cBathy.....	36
3.5.	MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO	38
3.5.1.	Descrição do Modelo.....	38
3.5.2.	Configurações dos cenários.....	39
3.6.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1.	BATIMETRIA INVERSA	46
4.2.	MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO	49
4.3.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	54
5.	CONCLUSÕES.....	59
6.	RECOMENDAÇÕES.....	60

1. INTRODUÇÃO

Praias arenosas são ecossistemas altamente dinâmicos e complexos, apresentando processos oceanográficos em diferentes escalas temporais e espaciais. A dinâmica ao longo das praias é influenciada pelos agentes hidrodinâmicos, fatores morfológicos, atividades humanas, infraestruturas sociais e presença de estruturas construídas. (MASSELINK et al., 2011). Dividem-se em três zonas: zona de surfe, zona de arrebentação e zona de espraiamento (Figura 1) (DAVIDSON-ARNOTT, 2010; MELO, 2016).

A zona de arrebentação é a porção do perfil praiial onde ocorre o processo de desestabilização e quebra das ondas incidentes. A zona de surfe é definida como a zona de dissipação da energia das ondas incidentes, estendendo-se da quebra da onda até a zona de espraiamento. A zona de espraiamento é limitada pelo fim da zona de surfe até a amplitude máxima do alcance das ondas sobre a costa, acontecendo os processos de fluxo (*swash*), e refluxo (*backwash*) (SILVA, 2006).

Figura 1. Zonas hidrodinâmica e morfológica típica em praia arenosa oceânica



Fonte: Modificada de SILVA (2006)

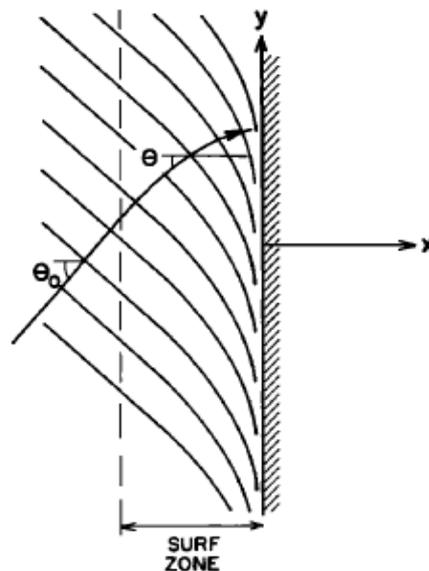
A fim de realizar a gestão costeira mais adequada de praias é necessário entender as mudanças da morfologia praiial em diferentes escalas e os processos hidrodinâmicos que as afetam (DAVIDSON-ARNOTT, 2010). A hidrodinâmica nas praias é controlada

principalmente pelas ondas, que através do processo de quebra dissipam sua energia e formam correntes (SHORT, 1999).

O excesso da quantidade de movimento do fluxo causado pelas ondas, é denominado de tensão de radiação tangencial (LONGUET-HIGGINS e STEWARD, 1964). A variação dessa tensão de um local para outro ao longo da coluna de água acarreta em um gradiente da força resultante das ondas, impactando os níveis médios do mar e a movimentação das águas, gerando três processos: diminuição do nível médio do mar na zona de arrebentação (*set-down*), o aumento do nível do mar na zona de surfe (*set-up*) e correntes longitudinais (BOSBOOM e STIVE, 2011).

As correntes longitudinais (y) são formadas quando as ondas se aproximam da linha de costa (x) com um ângulo oblíquo (θ) (Figura 2) gerando um fluxo da tensão de radiação longitudinal em direção à costa (LONGUET-HIGGIN, 1970).

Figura 2. Diagrama esquemático de ondas se aproximando com um ângulo oblíquo em relação à linha de costa.



Fonte: LONGUET-HIGGINS (1970)

As correntes longitudinais resultam em um deslocamento lateral da água devido ao fluxo paralelo à costa. Esse deslocamento lateral é responsável pelo transporte de sedimentos colocados em suspensão pelas ondas incidentes, podendo transportá-los por vários quilômetros (LONGUET-HIGGIN, 1970).

O transporte de sedimentos disponível é denominado de deriva litorânea. A deriva litorânea é extremamente dinâmica, mudando de direção e intensidade durante todo o ano e conseqüentemente modificando a morfologia e o balanço sedimentar da praia, constantemente (DALRYMPLE e DEAN, 2004).

Estudos como o de Chun e Suh (2017), analisando o processo de deriva litorânea na praia de Duck na Carolina do Norte, demonstram como esse processo pode afetar a configuração sedimentar das praias, transportando sedimento e modificando a sua distribuição. Gul *et al.* (2020) na baía de Kizkumu na Turquia confirmou que a deriva litorânea pode afetar a praia onde o fenômeno está acontecendo assim como impactar praias adjacentes gerando formações geomorfológicas e/ou áreas de erosão a partir da deposição ou retirada desses sedimentos.

Klein *et al.* (2006) observaram evidências de processos erosivos e deposicionais em diversas praias arenosas ao longo do litoral brasileiro evidenciando que apesar de ser um processo natural vem sido intensificados devido as ocupações que se instalam junto ao ambiente praias. Por sua vez essas ocupações são extremamente vulneráveis aos agentes hidrodinâmicos como ondas e correntes litorâneas, por isso a importância de estudar o processo de deriva litorânea.

Um fator determinante para avaliar o impacto da deriva litorânea é a velocidade da corrente longitudinal. Essa velocidade apresenta uma relação direta com ângulo de incidência entre a crista das ondas e a orientação da costa, com a declividade da praia, a máxima velocidade orbital da onda e o coeficiente de atrito do fundo, de acordo com a equação (1) deduzida por LONGUET-HIGGINS (1970):

$$V = \frac{5\pi \tan(\beta)}{8Cf} \mu_m \sin(\alpha_b) \cos(\alpha_b) \quad (1)$$

onde:

V = Velocidade da corrente longitudinal

Cf = coeficiente de atrito do fundo;

β = declividade da praia;

μ_m = máxima velocidade orbital;

α_b = ângulo entre crista da onda e as linhas batimétricas;

A equação (1) descreve a associação entre a velocidade da corrente, a energia e ângulos de incidência das ondas ao chegar na praia. Ângulos mais próximos a 45° indicam corrente longitudinal mais velozes. No entanto, ao ultrapassar ângulos superiores a 45° a velocidade das correntes tende a diminuir (ASHTON e MURRAY, 2006). Outros fatores que podem afetar a velocidade da corrente longitudinal são declives praias acentuados, alturas de ondas elevadas, ou a influência do vento sobre a coluna de água (DAVIDSON-ARNOTT, 2010; MASSELINK *et al.*, 2011).

As correntes longitudinais aumentam de intensidade em direção à ao mar, atingindo um máximo no seu máximo valor na arrebentação, a partir de onde decrescem (WRIGHT, 1985 *apud* JUNG, 2010). Feddersen e Guza (2003), mostram as mesmas tendências, comparando dados medidos em diferentes posições da zona de surfe da praia de Duck, que apresentavam valores mais intensos no meio da zona de surfe, diminuindo em direção ao mar.

No que tange as medições, os métodos utilizados para estimar e estudar as correntes longitudinais no ambiente praias, podem ser classificados de duas formas:

- (i) direto: através de medições por meio de equipamentos (SCHIMDT *et al.*, 2003; FEDDERSEN e GUZA, 2003; CASTELLE *et al.*, 2005; MACMAHAN *et al.*, 2009; SPYDELL e FEDDERSEN, 2012) ou
- (ii) indireto: através de equações empíricas; (RUESSINK *et al.*, 2001; DAHMANI *et al.*, 2021; BADRU *et al.*, 2022; STORLAZZI *et al.*, 2022).

Os métodos diretos podem ser subdivididos em duas categorias: método euleriano e método langrangeano. O método euleriano utiliza medidas oriundas de equipamentos estacionários, como os correntógrafos ou sensores perfilhadores ancorados que calculam a velocidade através da passagem do fluxo de água por sensores (ASSIREU *et al.*, 2003; FEDDERSEN e GUZA, 2003; CASTELLE *et al.*, 2005).

Feddersen e Guza (2003) mediram correntes com até 1,6 m/s no meio da zona de surfe, e até 1,0m/s em direção ao mar aberto, na praia de Duck, nos Estados Unidos, utilizando o método de ECM (*electromagnetic current-meters*). Castelle *et al.* (2005) mediram velocidades

entre 0,05 e 1,2 m/s na zona de surfe da praia de True Vert na França utilizando um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*).

Já o método langrangeano, baseia-se em medidas de instrumentos flutuantes referenciados a um sistema de coordenadas, que se movem com o objeto e são observados por um tempo, a exemplo de derivadores (ASSIREU *et al.*, 2003; SCHIMDT *et al.*, 2003; MACMAHAN *et al.*, 2009; SPYDELL e FEDDERSEN, 2012).

MacMahan *et al.* (2009) adaptaram um derivador de baixo custo, elaborado com um tubo PVC acoplado a um GPS de navegação que possibilita acompanhar o deslocamento do equipamento na zona de surfe. Utilizando a trajetória exercida pelo derivador e o tempo do deslocamento, os autores foram capazes de calcular a velocidade e a direção das correntes longitudinais.

Por sua vez, os métodos indiretos utilizam de equações empíricas sobre a circulação costeira e formulações matemáticas para determinar a velocidade das correntes longitudinais. A partir desses parâmetros calcula-se a corrente longitudinal, a deriva litorânea e o transporte de sedimentos (RUESSINK *et al.*, 2001).

Adicionalmente, a velocidade, direção e magnitude da corrente pode ser estimada de forma indireta por meio de modelos numéricos. Dahmani *et al.* (2021) empregaram o modelo MIKE21 para investigar o impacto de eventos extremos aos processos costeiros de corrente longitudinal e deriva litorânea na baía de Algier na Argélia. Badru *et al.* (2022) utilizaram o modelo MIKE 21, para calcular a velocidade das correntes longitudinais e o transporte sedimentar com o objetivo de avaliar a gestão de ambientes em erosão na costa da Nigéria. Storlazzi *et al.* (2022) determinaram através do modelo XBeach quais processos oceanográficos são afetados pela geomorfologia local.

Modelos numéricos são um conjunto de equações e procedimentos matemático e computacionais organizados na forma de algoritmos capazes de representar os processos hidrodinâmicos e morfológicos do ambiente marinho. Na oceanografia, os modelos numéricos utilizam dados coletados em campo, a equação de conservação de massa e teorias do comportamento dos oceanos para simular e prever diferentes processos que neles ocorrem, como por exemplo, a circulação marítima, as correntes, derrame de petróleo, transporte de sedimentos entre outros (HARARI, 2015; GRAZIOTTO, 2019).

Os modelos hidrodinâmicos são modelos utilizados para prever a circulação oceânica e modificações geomorfológicas de ambientes. Os modelos de circulação possuem grande importância, sendo seus resultados utilizados em modelos mais complexos tais como modelos de ondas (GUIMARÃES, 2014; DOBROCHINSKI *et al.*, 2022), de transporte de sedimentos (MESELHE *et al.*, 2012; CIRELLO, 2019; HUANG *et al.*, 2020) e de poluentes (GRAZIOTTO, 2019).

De acordo com Harari (2015) os modelos são divididos em dois tipos: gerais e específicos. A escolha do tipo de modelo é importante e está dependente da escala espacial a ser estudada. Modelos gerais são aqueles de larga escala que procuram modelar os oceanos de maneira mais completa, adotando hipóteses simplificadoras e parametrização de processos que ocorrem em escala menores (HARARI, 2015). Por exemplo, Stacey *et al.* (1995) desenvolveram um modelo para compreender a circulação em uma enseada, levando em consideração diferentes processos como maré, vento e o escoamento de água doce simultaneamente.

Enquanto os modelos específicos procuram estudar fenômenos de forma individual isolando-os ao máximo de outros fenômenos, para isso costuma-se utilizar escalas espaciais grandes e médias (HARARI, 2015). Exemplos seriam o uso de modelos para simular a propagação das marés em uma dada região costeira (HARARI e CAMARGO, 2003) ou o uso de modelos para simular a trajetória de um poluente, como o petróleo, em condições pré-determinadas que serão utilizados em planos de contingências e treinamento de respostas de emergência (GRAZIOTTO, 2019) ou modelos medindo as correntes longitudinais ou a ação das ondas sobre as praias, essenciais para um bom monitoramento e planejamento da costa (CIRELLO, 2019; MULLIGAN *et al.*, 2019; BADRU *et al.*, 2022).

A resolução do modelo é definida como a distância horizontal e vertical entre cada um dos pontos da grade computacional onde serão realizados os cálculos (HARARI, 2015). Uma má definição da resolução da malha computacional pode acarretar em falhas no modelo, onde os processos que pretendem ser estudados acabam sendo omitidos ou padronizados caso possuam a mesma (ou menor) ordem que o espaçamento da grade adotado (HARARI, 2015).

O modelo SWASH tem se mostrado promissor no estudo de processos de grande escala, possibilitando o uso de resoluções mais detalhadas, sendo empregados em diferentes projetos em uma crescente utilização (ZIJLEMA *et al.*, 2011; SMIT *et al.* 2013; GUIMARÃES, 2014;

LERMA *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; MULLIGAN *et al.*, 2019; HENDERSON *et al.* 2022). O modelo SWASH (*Simulating WAVes till SHore*) desenvolvido por Zijlema *et al.* (2011) foi criado especificamente para aplicações em áreas costeiras, ilhas, áreas alagadas e para resolver interação entre ondas e correntes (GUIMARÃES, 2014).

O modelo baseia-se em equações não lineares de água rasas, equação do *momentum* vertical e horizontal, simulando os processos da circulação marinha e a propagação de ondas com uma alta resolução espacial e temporal. O maior benefício deste modelo é a resolução da propagação individual de cada onda, potencialmente melhorando os resultados em menor escala (MULLIGAN *et al.*, 2019). Cirello (2019) estudou a influência das ondas de infragravidade no transporte de sedimento entre a praia Brava e Ingleses analisando a diferença entre modelos utilizando equação lineares e equações não-lineares constatando que modelos que consideram as equações não lineares apresentam um maior detalhamento dos processos oceanográficos na zona de surfe.

Recentemente o modelo SWASH foi testado para calcular correntes longitudinais induzidas por ondas. Zhang *et al.* (2018) avaliaram e confirmaram a capacidade do modelo SWASH de estimar as correntes longitudinais, com alta acurácia, utilizando apenas os parâmetros base do modelo. Mulligan *et al.* (2019) empregaram o modelo SWASH para investigar a influência de bancos paralelos à costa nas ondas e na corrente longitudinal em praias arenosas na Carolina do Norte. Além disso, ambos os autores observaram uma diferença no comportamento da corrente entre os sistemas praias sem e com bancos de areia.

A diferenciação entre as correntes longitudinais em praias com e sem bancos arenosos sugere a sensibilidade do modelo em relação a batimetria incluída nele (RUESSINK *et al.*, 2001; ZHANG *et al.*, 2018; MULLIGAN *et al.*, 2019). Por essa razão, o levantamento de dados batimétricos para modelos numéricos é de extrema importância, existindo uma relação direta entre a precisão da batimetria usada e o resultado do modelo numérico (HOLMAN e HALLER, 2013).

A batimetria trata de um conjunto de dados que determina as características morfométricas de corpos d'água possibilitando um maior entendimento das estruturas e do funcionamento dos ambientes aquáticos (RESCK *et al.*, 2007). A obtenção desse conjunto de dados é nomeada de levantamento batimétrico. Ferreira *et al.* (2016) definiram o levantamento batimétrico como as medições de profundidades associadas a uma posição na superfície.

Os primeiros levantamentos batimétricos foram feitos durante a segunda guerra mundial com intuito de auxiliar no planejamento e ataques à costa da Europa, como por exemplo, na invasão da Normandia (PINET, 2013). Após esses primeiros levantamentos, ao longo dos anos diferentes métodos foram desenvolvidos tentando melhorar a relação custo-benefício e a precisão dos dados levantados.

Os métodos de levantamentos batimétricos também podem ser classificados, de acordo com a maneira de aquisição como direto ou indireto. Métodos realizados de forma direta, são aqueles onde os dados são adquiridos com o auxílio de equipamento em campo. Por exemplo, o uso de uma corda com um peso e marcações para determinar a profundidade do local ou os *CRABs* (*Coastal Research Amphibious Buggy*), veículos motorizados construídos com uma régua acoplada a sua estrutura, permitindo pesquisadores coletar profundidades de até 9 metros em condições de tempestades moderadas com ondas de até 2 metros (BIRKEMEIER e MASON, 1984).

Com o avanço da tecnologia os primeiros métodos indiretos para o levantamento batimétrico foram desenvolvidos. Um exemplo são os sistemas acústicos. Os sistemas acústicos, como os ecobatímetros e sonares são acoplados a diferentes veículos aquáticos como embarcações ou moto náutica e conseguem calcular a profundidade local emitindo sons e calculando a distância baseando-se na equação de propagação do som na água (RESCK *et al.*, 2007; VOS, 2017). Alguns desses equipamentos são utilizados em conjunto com sistemas de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em tempo real visando o georreferenciamento das profundidades e melhorando sua precisão (FERREIRA *et al.*, 2016).

A aquisição da batimetria em regiões de alto dinamismo como as praias arenosas, pelos métodos de medição indireta *in-situ* apresentados anteriormente é dificultada pelas condições desses ambientes. A constante quebra de ondas e fortes correntes na zona de surfe geram um local hostil para os seres humanos e equipamentos (HOLMAN e HALLER, 2013). Por essa razão, técnicas de coleta de dados batimétricos, para esses ambientes por sensoriamento remoto, têm crescido exponencialmente (PLANT *et al.*, 2008; KAO *et al.*, 2009; ABILEAH e TRIZNA, 2010; HOLMAN e HOLLAND, 2011; TURNER *et al.*, 2016; HOLMAN *et al.*, 2016, ABDALLAH *et al.* 2017; CHUANG *et al.*, 2021; ALMAR *et al.*, 2021).

As técnicas utilizando o sensoriamento remoto apresentam um ótimo potencial, pois suprimem as necessidades de medições diretas na zona de surfe, apresentam baixa necessidade

de manutenção, baixo custo e alta capacidade de coleção de dados para análise de longa e curta escala temporal e espacial (HOLMAN *et al.*, 2003). De forma subsidiária, diminuem a exposição de pesquisadores e equipamentos a condições extremas (VOS, 2017).

Holman e Haller (2013) apresentaram soluções utilizando técnicas de sensoriamento remoto para aquisição da batimetria na zona de surfe. Problemas como a falta de geolocalização podem ser solucionados por estimativa da localização a partir de técnicas de fotogrametria e metadados das imagens. Imagens com alto nível de ruídos podem ser processadas utilizando-se algoritmos de filtragem dos ruídos, recuperando dados com nível de confiança elevado.

Plant *et al.* (2008) foram um dos primeiros investigadores a utilizar dados de batimetria da zona de surfe, coletado por técnicas de sensoriamento remoto como dados de entrada do modelo numérico. Os autores desenvolveram uma técnica própria, denominada *Beach Wizard*, de assimilação dos dados coletados de satélites para estimar a batimetria e alterações morfodinâmicas. A técnica baseia-se na diferença entre a quantidade de energia dissipada, adquirida por técnicas de sensoriamento remoto, e quantidades de energia correspondentes calculadas por modelos numéricos usando séries temporais da velocidade da onda.

Kao *et al.* (2009) definiram a existência de dois métodos para calcular a batimetria utilizando imagens de satélite óticos e a lei de Lambert-Berr, que relaciona a absorção da luz com as propriedades do material atravessados por esta. O primeiro método utiliza uma imagem de satélite e dados coletados por sonar enquanto o segundo utiliza múltiplas imagens para calcular a batimetria.

Normalmente, comete-se um equívoco ao associar o termo sensoriamento remoto a dados coletados por imagens de satélites. O termo sensoriamento remoto é bem amplo e pode descrever qualquer técnica capaz de obter imagens à distância sobre a superfície terrestre. Como por exemplo: o uso de sensores aéreos em plataformas tripuladas e plataformas não tripuladas ou sensores fixos na costa sendo acoplados em faróis, torres ou prédios (HOLMAN e HALLER, 2013). Essas diferentes plataformas de uso, apresentam diferentes tipos de sensores: ativos e passivos. Sensores ativos são aqueles que não precisam da luz solar para adquirir dados. Os radares banda X e o LIDAR, são os sensores ativos mais utilizados e melhor desenvolvidos até o momento (VOS, 2017).

Abileah e Trizna (2010), utilizaram imagens coletadas por um radar de banda X para determinar a batimetria na praia de Duck na Carolina do Norte. Chuang *et al.* (2021) determinou

a batimetria na zona costeira de Tainan na Tailândia, utilizando o número de ondas identificadas em imagens coletadas pelo radar da Banda X e a sua relação com a profundidade.

Abdallah *et al.* (2017) estudaram a capacidade de dois sensores LIDAR, com diferentes configurações de comprimento de onda, em estimar a batimetria em diferentes corpos da água. Concluindo que os comprimentos de ondas no espectro da luz verde são capazes de penetrar maiores profundidades melhorando a precisão desse método e o uso de satélite para aquisição da profundidade está inversamente relacionado à quantidade de partículas em suspensão. Almar *et al.* (2021) utilizaram imagens adquiridas pela constelação de satélite Sentinel-2 para calcular a batimetria de forma inversa e apresentar primeiro atlas batimétrico global, com escala menor que 1 quilômetro.

Sensores passivos, por sua vez, tais como as câmeras e radiômetros, operam capturando fótons que são refletidos e/ou emitidos pela superfície (HOLMAN e HALLER, 2013). Eles são ferramentas úteis para o estudo da zona de surfe, isso porque a mesma apresenta uma riqueza de assinaturas ópticas disponível no espectro visível que permitem quantificar importantes variáveis do ambiente (HOLMAN e STANLEY, 2007).

A partir de sensores passivos é possível realizar o monitoramento contínuo das praias por vídeo imageamento. Essa metodologia foi desenvolvida em 1997 capaz de identificar e quantificar processos físicos e geomorfológicos nos oceanos utilizando câmeras para captura de vídeos (HOLLAND *et al.*, 1997). Atualmente esse método é utilizado em países como os Estados Unidos, Inglaterra, Austrália, Japão e Brasil (VOS, 2017).

O sistema de monitoramento utilizando vídeo imageamento opera a partir de imagens da costa coletadas para identificar características da zona de surfe. As imagens capturadas podem ser utilizadas para identificar características da zona de surfe como batimetria, regiões preferenciais de quebra das ondas, posição da linha de costa (LIPPMANN e HOLMAN, 1990; HOLMAN e STANLEY, 2007; HOLMAN e HALLER, 2013). Em 1990, Lippmann e Holman quantificaram a variabilidade dos bancos arenosos, na praia de Duck na Carolina do Norte, em uma escala temporal e espacial utilizando imagens *timex*, produto resultante dos dados coletados.

Todavia, esses sistemas de monitoramento de praia e aquisição de dados de forma remota utilizando sensores passivos podem sofrer pela dificuldade de acesso das áreas costeiras ou pela falta de infraestrutura disponibilizada nas praias (HOLMAN *et al.*, 2017). Para

solucionar esse problema e facilitar a aquisição de dados para os modelos numéricos e monitoramento das praias propôs-se o uso dos Veículo Aéreos Não-Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones (HOLMAN e HOLLAND., 2011; TURNER *et al.*, 2016; HOLMAN *et al.*, 2017).

Recentemente, os VANTs deixaram de ser utilizados apenas por especialistas técnicos ou amadores entusiasmados e se tornaram equipamentos disponíveis e de fácil utilização na aquisição de dados de ambientes costeiros aparentando ser uma técnica superior, sendo uma alternativa mais barata que pode ser utilizada em diferentes regiões de difícil acesso (TURNER *et al.*, 2016).

Essencialmente existem dois tipos de VANTs: (i) os multi-rotores e (ii) os de asas fixas. Esses veículos modernos são equipados com motores, baterias, sistema de navegação e câmeras para capturas de imagens (TURNER *et al.*, 2016). Os multi-rotores são aqueles onde a estrutura contém hélices, enquanto os de asas fixas são aqueles com formato de avião e apenas um rotor.

Atualmente os VANTs são utilizados em diferentes setores da engenharia e mapeamento (TURNER *et al.*, 2016), podendo citar seu uso em aplicações como mapeamento e identificação de árvores (ONISHI e ISE, 2021), análises da produtividade agrícola utilizando parâmetros de umidade da vegetação (MATESE e DI GENNARO, 2021), mineração (PARK e CHOI, 2020) e no mapeamento de zonas costeiras (PRODANOV *et al.*, 2020).

Holman *et al.* (2017) exploraram o uso de VANTs multi-rotores para coleta de imagens em ambientes costeiros com baixo custo e alta flexibilidade para variação temporal e espacial, substituindo o sistema de imageamento por câmeras fixas. Holman *et al.* (2016) verificaram eficiência do algoritmo cBathy para estimar a batimetria utilizando vídeos da velocidade das ondas de superfície adquiridos por VANTs e comparando os dados com as informações coletadas *in-situ* por sistema CRAB.

Lin *et al.* (2019) utilizaram VANTs com sistema LIDAR capaz de adquirir uma nuvem de pontos uniforme informando os ambientes geomorfodinâmicos do local. Araújo *et al.* (2021) conseguiram adquirir informações morfológicas e identificar processos costeiros em praias arenosas utilizando veículos aéreos não tripulados.

Considerando a importância do monitoramento e gerenciamento dos sistemas dinâmicas das praias arenosas, a relação da eficácia dos modelos a batimetria, as dificuldades de aquisição de dados, em especial da batimetria na zona de surfe e a eficácia do uso de VANTs na aquisição

de dados de forma remota, o presente estudo tem como hipótese que é possível compreender o comportamento dos processos costeiros na zona de surfe através da assimilação dos espectros de ondas e do acoplamento entre batimetria obtida de forma remota por VANT e o uso de modelo numéricos em praias arenosas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Compreender e caracterizar o comportamento de correntes longitudinais na zona de surfe na praia do Campeche por meio do acoplamento entre ferramentas de modelagem numérica e batimetria inversa.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar a batimetria na zona de surfe através do algoritmo *cBathy* por intermédio de vídeos obtidos via Veículo Aéreo Não Tripulado;
- Determinar os padrões de correntes litorâneas através do uso de espectro de ondas e batimetria remota no modelo SWASH;
- Avaliar o desempenho da metodologia utilizada através da comparação dos resultados obtidos com dados adquiridos em campo;

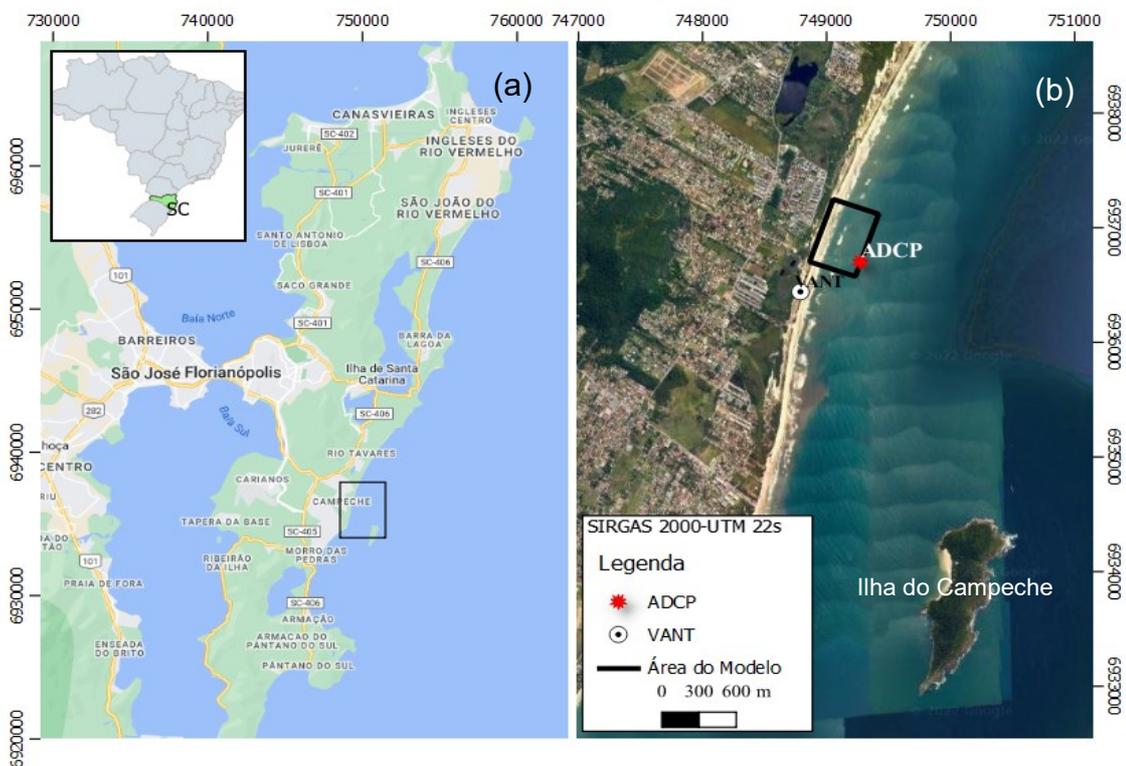
3. METODOLOGIA

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na praia do Campeche, no município de Florianópolis (SC) (Figura 3). A praia do Campeche é classificada como uma praia oceânica aberta intermediária com sistema de bancos múltiplos (TORRONTÉGUY, 2002; KLEIN *et al.*, 2006). Situada na costa sudeste de Florianópolis entre as praias da Joaquina e a praia do Morro das Pedras, com uma extensão de 5 quilômetros, largura média de 24 metros e uma declividade de 12° (HORN FILHO *et al.*, 2014).

A praia do Campeche sofre processos de erosão associados à sua dinâmica praial, geradas por agentes naturais que transformam a morfologia geral, como as ondas e correntes litorâneas (KLEIN *et al.* 2006). A praia apresenta sedimentos de tamanhos finos e médios, sendo bem a moderadamente selecionados, com uma tonalidade mais clara (SANTOS, 1995).

Figura 3. Mapa de localização da área de estudo. (a) Ilha de Santa Catarina e estado de Santa Catarina (inset); (b) Praia do Campeche.



O clima do litoral catarinense é do tipo subtropical com invernos relativamente frios e verões quentes, apresentando uma frequência média mensal de três a quatro frentes frias durante todos os meses do ano (RODRIGUES *et al.*, 2004). Tais características são resultantes da presença de duas massas de ar: a Massa Tropical Atlântica (MTA) caracterizada por ar tropical quente e úmido com tendência a estabilidade e a Massa Polar Atlântica (MPA) caracterizada por massas de ar frias que se deslocam de altas altitudes rumo a nordeste, com elevada velocidade e trajetória variável ao longo da costa (MARTIN *et al.*, 1988).

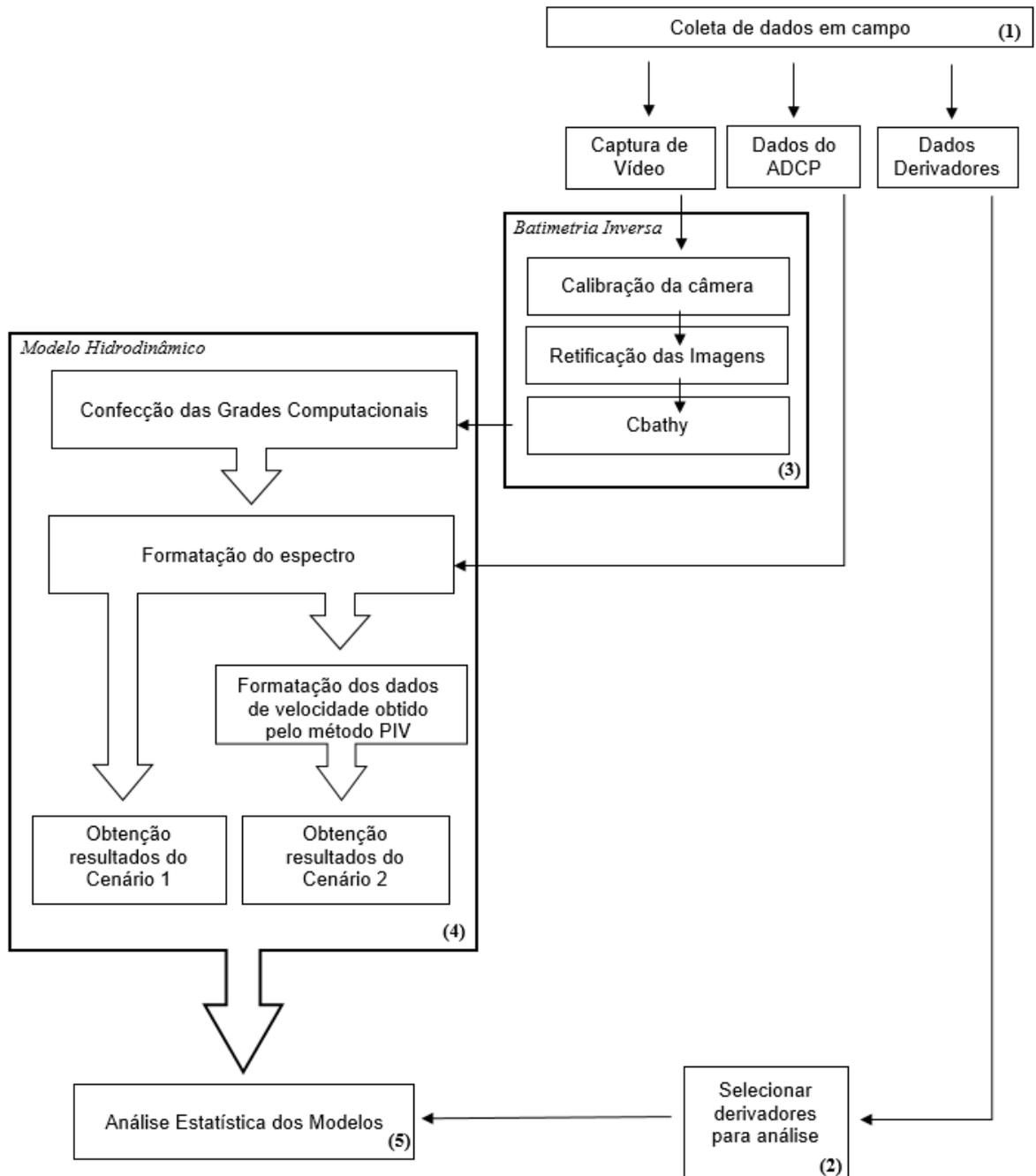
A climatologia de frentes frias do litoral Sul e Sudeste do Brasil gera um padrão típico das trajetórias das ondas na região (RODRIGUES *et al.*, 2004). Na Ilha de Santa Catarina foram definidos cinco padrões de ondas consistindo em duas ondulações e três tipos de vagas: ondulação de Sul ($\theta=162^\circ$), ondulação de sudeste ($\theta=146^\circ$); vagas de Leste ($\theta=92^\circ$), vagas de nordeste ($\theta=27^\circ$); e vagas de Sul ($\theta=188^\circ$). De maneira geral, pode-se considerar que as ondulações provenientes do quadrante leste (nordeste, leste e sudeste) e quadrante sul predominam na ilha, cabendo ressaltar que eventualmente ondas do quadrante sul apresentam-se com altura significativa superior a 4 m (ARAÚJO *et al.*, 2003).

A praia do Campeche está localizada no litoral oriental da ilha, um local aberto com alta energia sofrendo atuação dos agentes hidrodinâmicos influenciados diretamente pelo oceano Atlântico (KLEIN *et al.*, 2006).

3.2. ETAPAS METODOLÓGICAS

Este trabalho é composto por 5 principais etapas metodológicas, a saber, coleta de dados, a seleção de derivadores utilizados para análise estatística dos cenários do modelo, a estimativa da batimetria inversa utilizando o *cBathy*, a configuração dos cenários do modelo SWASH, e finalmente a análise estatística dos cenários. A seguir apresenta-se o fluxograma com as etapas metodológicas (Figura 4) e na sequência descreve-se as mesmas.

Figura 4. Fluxograma da metodologia.



3.3. COLETA DE DADOS

A base de dados para o presente estudo é composta por dados coletados durante o experimento na praia do Campeche chamado de *CampEX* realizado entre os dias 27 de abril a 02 de maio de 2019. No experimento foram utilizados 4 equipamentos: o GPS cinemático para determinar a localização de pontos de controle na área de estudo, o VANT para adquirir os vídeos utilizados para a geração de batimetria inversa, o ADCP para obter dados sobre as ondas incidentes assimiladas ao modelo hidrodinâmico e os derivadores que foram aproveitados para realizar a análise estatística do modelo.

A coleta de dados do campo do experimento CampEx ocorreu de forma simultânea com sub-equipes sendo responsáveis por diferentes atividades, possibilitando que múltiplas coletas de dados ocorressem de forma síncrona.

Os pontos de controle foram obtidos com o auxílio do aparelho GNSS RTK, modelo R5 da marca Trimble (Figura 5). Segundo o fabricante, esse modelo tem precisão horizontal de 3 milímetros + 0,1 ppm RMS e vertical de 3,5 mm +0,4 ppm com 220 canais GNSS e memória interna de 11MB.

Figura 5. Receptor GNSS RTK utilizado para a coleta de pontos de controle.



Fonte: <https://agftopografia.com/produto/receptor-trimble-rtk-r6/>

A marcação dos 7 pontos de controle no solo (*Ground Control Points* - GCPs) foi realizada diariamente às sete da manhã. A determinação da posição geográfica e elevação, que

foram posteriormente utilizadas no georreferenciamento e retificação das imagens, foi feita utilizando o método relativo cinemático.

O método relativo cinemático conta com dois equipamentos de GNSS que interagem entre si. O primeiro equipamento é a base, essa fica em um único ponto durante toda a coleta de dados. O segundo equipamento, denominado *rover*, coleta a informação da posição de cada um dos pontos de interesse em relação à base (TANAJURA *et al.*, 2011).

Após a coleta, os dados foram processados. O pós-processamento tem como objetivo relacionar o ponto base coletado em campo com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS (RBMC) e proceder os ajustes dos demais pontos.

Neste experimento o equipamento base foi montado na guarita dos salva-vidas local rastreado as informações planialtimétricas por 4 horas, enquanto cada um dos pontos coletados pelo *rover* foram rastreados por aproximadamente 5 minutos. Para o pós-processamento da base do experimento foi utilizado o software Trimble Business, georreferenciando as coordenadas do equipamento base ao ponto da rede RBMC localizado no IFSC (Estação 94052).

A aquisição dos vídeos foi feita por VANT modelo Mavic PRO da marca DJI (Figura 6). O Mavic possui uma câmera acoplada com campo de visão de 78,8°, distância focal de 26 mm e um sistema GNSS a bordo que auxilia na navegação e estabilização dos 3-eixos, diminuindo o ruído nas imagens e vídeos coletados.

Figura 6. Veículo aéreo não tripulado utilizado na captura dos dados coletados em campo: modelo Mavic PRO da DJI.



Fonte: <https://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2016/10/karma-ou-mavic-pro-descubra-qual-drone-dobavel-comprar.html>

Os vídeos foram capturados com duração de 17 minutos gravados com resolução de 4K e 2,7K. No total foram realizados 6 voos com o VANT diários entre as 7:00 AM e as 12:00 PM, totalizando 18 voos ao longo do experimento. No entanto apenas 13 vídeos puderam ser utilizados para o processamento. Os outros vídeos foram descartados pois não atendiam os requisitos mínimos necessários para a metodologia de pós-processamento das imagens.

Dos 13 vídeos capturados, 4 vídeos foram capturados na resolução 4K e 9 vídeos foram capturados 2,7K. A troca na resolução foi feita em campo para diminuir o tamanho do vídeo devido a uma limitação de espaço para o armazenamento de dados. Porém a perda de resolução impossibilitou o reconhecimento dos pontos de controle na imagem.

Durante os voos o VANT se mantinha numa altitude aproximada de 75 metros durante a captura das imagens. Previamente a cada gravação, foi capturada uma imagem inicial utilizada para obter os parâmetros extrínsecos da câmera (*azimuth, tilt, roll*), necessários para o georreferenciamento.

Após o experimento, os vídeos foram pós-processados em laboratório transformados em quadros, utilizando uma taxa de 2 quadros por segundo. A taxa é o número de quadros gerados para cada segundo de vídeo. Portanto, foram gerados aproximadamente 2.030 quadros para cada vídeo.

A aquisição de dados sobre o comportamento das ondas locais durante o experimento foi feita utilizando o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). O ADCP é um perfilador acústico tipo *doppler* capaz de coletar dados referentes a hidrodinâmica, tais como a altura significativa das ondas, período médio e a direção de propagação das ondas. Para este experimento o equipamento utilizado foi o ADCP Nortek modelo Aquadopp 1MHz (Figura 7).

Figura 7. Perfilador Acústico tipo Doppler da Nortek modelo Aquadopp 1MHz, utilizado em campo

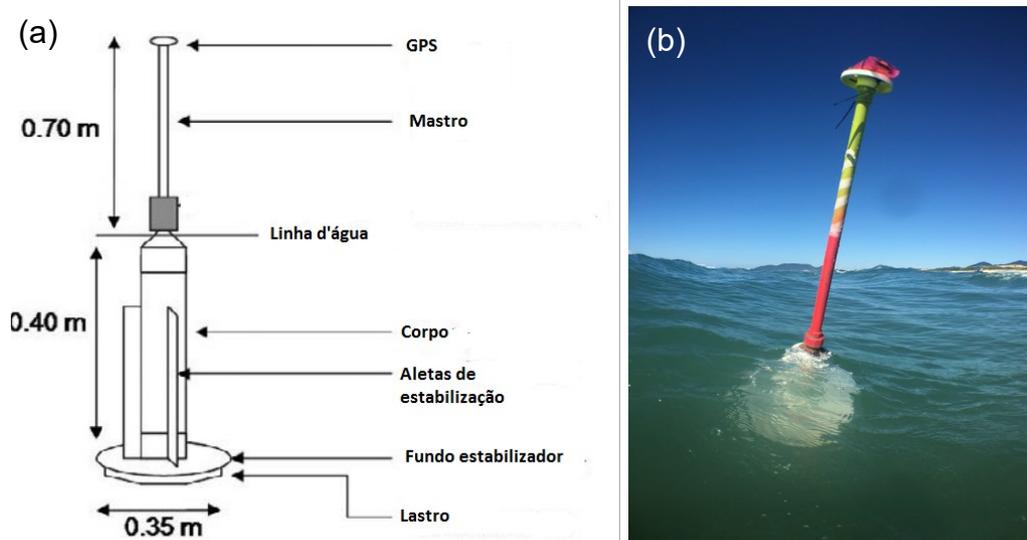


O ADCP foi fundeado com o apoio de uma moto náutica na posição 749671.42 m E 6936509.05 m S a cerca de 18 metros de profundidade. O equipamento foi configurado para armazenar informações a cada meia hora na sua memória interna. Os dados armazenados foram a propagação direcional, a energia espectral e altura significativa das ondas a cada 30 min, intervalo empregado na gravação dos dados. Todas essas características foram utilizadas para formatação dos espectros de ondas a ser assimilado no modelo numérico.

O derivador utilizado no CampEx é uma adaptação baseada no equipamento desenvolvido e testado por Schmidt *et al.* (2003) e posteriormente modificado por Machmahn *et al.* (2009) (Figura 8). Esse equipamento é constituído por um disco de 0,35 m de diâmetro com um lastro acoplado, sobre o disco foi montado um corpo com o mastro medindo aproximadamente 1,3 metros e no corpo foram adicionadas aletas, com o intuito de auxiliar na movimentação do derivador. O conjunto disco mais lastro estabiliza o derivador permite que o derivador flutue, se mantendo neutro na coluna d'água, não sendo em direção à costa pela quebra das ondas.

Acoplado ao derivador tinha-se um GPS de navegação capaz de determinar a sua posição a cada passo de tempo, possibilitando calcular a distância euclidiana entre as posições registradas pelo GPS possibilitando o cálculo da velocidade de deslocamento do equipamento.

Figura 8. Derivador, utilizado no experimento. (a) Desenho esquemático. (b) Derivador em funcionamento na prática.



Fonte: Adaptada de MachMahn *et al.* (2009).

O GPS utilizado foi o Garmim modelo *Etrex-10*, com acurácia de 3 metros, e o registro de cada posição foi configurado para ocorrer a cada segundo. O derivador foi lançado um total de 40 vezes no dia 27 de abril.

Cada lançamento registrava as posições do GPS ao longo do tempo, utilizando essa informação para estimar a velocidade e direção da corrente longitudinal na zona de surfe na área de estudo. O derivador era lançado constantemente na mesma posição inicial, seguindo sua trajetória até sair da zona de surfe. Quando o equipamento saía da zona de surfe ao retornarem à praia ou por fuga em direção ao oceano aberto, o mesmo era resgatado, respectivamente por uma equipe na terra ou por uma equipe no mar utilizando uma moto aquática. O equipamento uma vez resgatado era relançado da posição inicial.

A partir desses 40 lançamentos foram selecionados, quatro percursos coincidentes com o horário dos vídeos para realizar as análises estatísticas de cada simulação. Os percursos foram selecionados tentando identificar diferentes padrões, como retorno à praia, fuga, circulante ou meandrante.

3.4. GERAÇÃO DA BATIMETRIA INVERSA

A batimetria aplicada neste estudo foi estimada pelo método inverso, implementando o algoritmo *cBathy* em imagens retificadas e georreferenciadas coletadas via VANT. O algoritmo usa a série de imagens criadas para observação de movimentos de ondas na superfície, estimando as frequências dominantes e o número de onda correspondente. Com essas variáveis, é possível estimar a profundidade na área da imagem (HOLMAN *et al.*, 2013). A fim de gerar a batimetria inversa são necessários três passos: calibração da câmera, retificação das imagens e aplicação do algoritmo *cBathy* explicados nas subseções a seguir.

3.4.1. Calibração da câmera

O processo de calibração da câmera tem como objetivo determinar as características óticas e geométricas da câmera (parâmetros intrínsecos e extrínsecos) capazes de corrigir as distorções que ocorrem ao representar um ambiente 3D em um plano 2D (ZHANG, 1999). O processo de calibração da câmera é essencial uma vez que esses dados são necessários para o georreferenciamento das imagens capturadas em campo.

Existem 7 parâmetros da câmera que devem ser calculados para realizar o georreferenciamento, sendo 4 parâmetros intrínsecos e 3 extrínsecos. Segundo VOS (2017) os parâmetros intrínsecos calculados são necessários para correção da distorção da lente e a distância real dos pixels entre os objetos, sendo eles:

- (i) **Distância focal:** distância do centro da câmera até a extensão da imagem medida em pixel;
- (ii) **Principal ponto deslocado:** o ponto de intersecção entre a linha perpendicular que passa pelo centro da câmera e o plano da imagem;
- (iii) **Distorção radial:** a distorção que ocorre nas bordas da imagem devido a curvatura dos raios luminosos causada pela curvatura da lente;
- (iv) **Distorção tangencial:** a distorção que ocorre quando a lente da câmera e a imagem não estão exatamente paralelas uma à outra;

A calibração dos parâmetros intrínsecos da câmera neste trabalho foi realizada utilizando o algoritmo *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (versão 2017) desenvolvido pela Caltech (ZHANG, 1999). O primeiro passo nessa ferramenta é a leitura das imagens de calibração (Figura 9). As imagens de calibração são um conjunto de imagens de um quadro xadrez, com dimensões conhecidas, capturadas em diferentes posições e ângulos em relação a câmera.

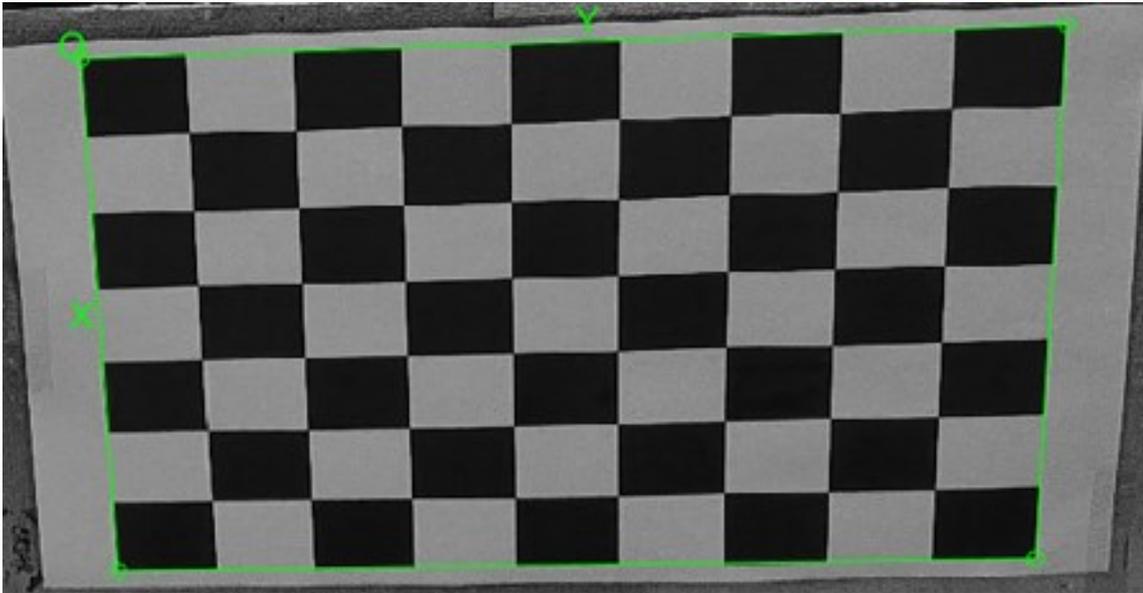
Figura 9. Imagens utilizadas para calibração da câmera.



Após a leitura das imagens é necessário estabelecer a grade de interesse na imagem. A grade é a área delimitada pela malha xadrez que se mantém igual para todas as imagens de calibração, possibilitando a automatização do método. Informando o tamanho e o número de elementos da grade da primeira imagem, o sistema consegue reconhecer a grade nas próximas imagens.

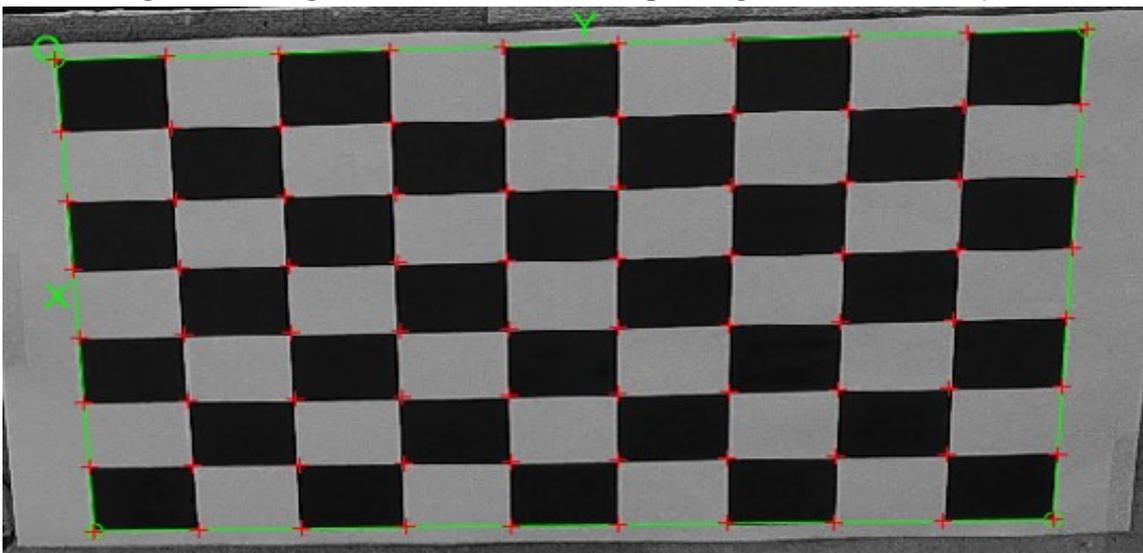
Para a calibração da câmera do VANT utilizada nesse experimento, a grade utilizado foi de 7 elementos no eixo x e 9 elementos no eixo y, com resolução de 0,8 x 0,8cm (Figura 10).

Figura 10. Grade utilizado para calibração.



Após a extração da grade na primeira imagem, o programa reconhece a grade nas demais imagens e extrai o canto de cada um dos elementos, considerando o coeficiente de distorção calculado pelo programa. O usuário deve buscar o melhor coeficiente de distorção por tentativa e erro. O processo de calibração é concluído quando ocorre uma coincidência entre os cantos extraídos pelo cálculo (cruz vermelha) sobre a imagem real (Figura 11).

Figura 11. Imagem com cantos extraídos pelo algoritmo de calibração.



Uma vez confirmado o coeficiente de distorção selecionado, o algoritmo calcula os parâmetros intrínsecos da câmera (Tabela 1 e Apêndice A)

Tabela 1. Resultado da Calibração

Parâmetro	Valor Calculado (pixel)					
Distância Focal	3057,84080	3053,62490	$\pm 22,74993$	21,42372		
Ponto Principal	1919,50000	1079,50000	$\pm 0,00000$	0,00000		
Distorção	0,07095	-0,59543	-0,00952	0,01245	$0,00000 \pm 0,05572$	0,15199
			0,00171	0,00633	0,00000	

Os parâmetros extrínsecos descrevem a posição da câmera em relação ao mundo e são necessários para calcular a matriz de rotação utilizada na correção e transformação das coordenadas da câmera para as coordenadas reais (VOS, 2017). A matriz de rotação é calculada a partir de três ângulos da câmera: *azimuth*, *tilt* e *roll* (WOLF E DEWITT, 2010 *apud* VOS, 2017). Neste trabalho os parâmetros extrínsecos da câmera foram calculados a partir dos metadados das imagens obtidas pelo VANT realizadas em campo antes de cada vídeo, descritas na etapa 3.2.

3.4.2. Retificação das Imagens

Através do processo de retificação, imagens oblíquas podem ser planificadas e escalonadas (HOLLAND *et al.*,1997), possibilitando quantificar feições morfológicas e propriedades das ondas, como: frequência e o número de ondas. Para o processo de retificação é necessário conhecer as características óticas (intrínsecas e extrínsecas) da câmera obtidas através da calibração da câmera e dos metadados da imagem capturada em campo. Neste estudo as imagens foram retificadas utilizando o algoritmo do UAV-Processing de VOS (2017).

O processo de retificação utiliza uma matriz de transformação (2), para relacionar os pontos-2D selecionados na imagem a pontos 3-D conhecidos no mundo real. Desta maneira, retificando as imagens oblíquas e georreferenciando as mesmas as coordenadas do mundo real em um único plano altimétrico conhecido (Figura 12).

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P_{3 \times 4} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde:

u, v = coordenadas do pixel da câmera;

x, y, z = coordenada no mundo real;

$P_{3 \times 4}$ = matriz da câmera

A matriz da câmera (3) é o produto de duas matrizes dadas pelos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. A matriz intrínseca (4) representa as características internas e a matriz extrínseca define os ângulos entre a imagem da câmera e o mundo real, utilizando a matriz de rotação (5), uma matriz identidade e o vetor de coordenadas da câmera no mundo real no momento que a imagem foi tirada.

$$P_{3 \times 4} = K * R[I | -C] \quad (3)$$

onde:

$P_{3 \times 4}$ = matriz da câmera;

K = matriz intrínseca;

R = matriz de rotação;

I = matriz identidade $_{3 \times 3}$;

C = vetor das coordenadas iniciais da câmera;

$$K = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

K = matriz intrínseca;

f_u, f_v = distância focal em u e v , respectivamente;

u_0, v_0 = ponto principal em u e em v , respectivamente;

$$R = \begin{bmatrix} \cos a * \cos s + \sin a * \cos t * \sin s & -\cos s * \sin a + \sin s * \cos t * \cos a & \sin s * \sin t \\ -\sin s * \cos a + \cos s * \cos t * \sin a & \sin s * \sin a + \cos s * \cos t * \cos a & \cos s * \sin t \\ \sin t * \sin a & \sin t * \cos a & -\cos t \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde:

R = matriz de rotação;

a = azimuth;

t = tilt;

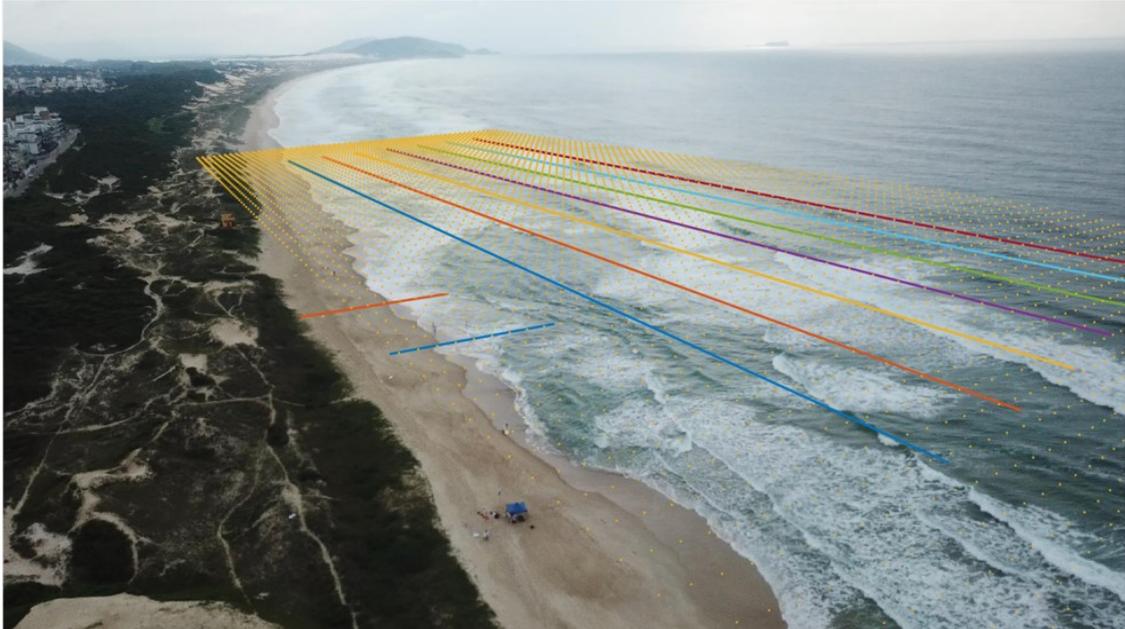
s = swing (roll);

Figura 12. Exemplo do georreferenciamento das imagens, cruzes coloridas, pontos selecionados na imagem e círculos vermelhos representam as coordenadas no mundo real.



A partir das imagens retificadas, define-se a matriz de interesse para calcular a intensidade luminosa de cada ponto, utilizada no algoritmo do cBathy denominada *Pixel Instrument Matrix* (Figura 13). Neste experimento foi determinado uma *Pixel Instrument Matrix* com tamanho de 520 por 780 metros. A matriz possuía 52x39 elementos com espaçamentos de 10 metros longitudinalmente e 20 latitudinalmente. O tamanho da matriz é determinado considerando a máxima área afetada pela ação das ondas na zona de surfe.

Figura 13. *Pixel Instrument Matrix*.



3.4.3. Algoritmo cBathy

O cBathy é um algoritmo de três fases utilizado para calcular e gerar mapas batimétricos baseados em séries de imagens onde se identifica os movimentos das ondas de superfície (HOLMAN *et al.*, 2013). O algoritmo fundamenta-se na relação teórica entre o comprimento da onda, o período da onda e a profundidade local, conhecida como Equação Linear de Dispersão:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (6)$$

onde:

σ = frequência das ondas;

k = número radial das ondas;

g = aceleração gravitacional;

h = profundidade.

O cBathy analisa uma série de pontos selecionados pelo usuário utilizando informações dos dados dos pixels circundantes dentro um intervalo, também especificado pelo usuário.

Dentro desse bloco o objetivo é estimar o número de onda (k) para cada conjunto de frequência possível (σ), estimando a profundidade para cada par (k, σ) usando a equação (6). As análises em cada ponto consistem em três fases:

O objetivo da Fase 1 é encontrar uma combinação de frequências para cada ponto da imagem, bem como o intervalo de confiança dessas combinações, o número de onda para cada frequência e pôr fim a profundidade equivalente para cada ponto. Para atingir este objetivo, um total de 5 passos são seguidos (HOLMAN *et al.*, 2013).

O primeiro passo é usar a transformada de Fourier (7) para analisar o domínio da frequência em cada pixel da série temporal de intensidade luminosa. Usando a seguinte expressão numérica:

$$G(x_p, y_p, f) = FT(I(x_p, y_p, t)) \quad (7)$$

onde,

G = Intensidade luminosa óptica da série temporal;

x_p, y_p = o posicionamento de cada pixel;

f = frequência da onda do pixel;

FT = transformada de Fourier;

I = matriz identidade;

t = tempo;

Posteriormente normaliza-se os coeficientes encontrados no passo anterior. Isso é feito para desconsiderar a variação espacial da magnitude do coeficiente normalizado representando apenas a fase da onda. O próximo passo é definir os melhores valores para o número de onda e direção considerando os valores reais e os observados na série temporal. O quarto passo deve relacionar cada par (número de onda e frequência) com a profundidade usando a equação linear da dispersão (6). Finalmente cada profundidade deve ser corrigida, subtraindo a influência da maré relacionando a profundidade a um datum vertical (HOLMAN *et al.*, 2013.).

A Fase 2 consiste em combinar objetivamente o conjunto de número de onda dependente de frequência e profundidade estimada, encontrado na fase 1. A profundidade final estimada é o valor que produz o melhor ajuste entre número de onda modelado e observado, ou seja, entre observações da fase 1 de k e aquelas previstas pela equação (6). Assim, ao final desta

fase, existe apenas um único resultado de profundidade estimado para cada pixel analisado. Para cada pixel é estimado um erro entre a profundidade calculada usando o número de onda modelado e o número de onda observado (HOLMAN *et al.*, *op. cit.*).

O objetivo da fase 3 é calcular uma estimativa de profundidade dinâmica em uma escala de tempo. Possibilitando suavizar a profundidade local e estimar a batimetria com mais precisão. O processo de suavização utilizando o filtro de Kalman é feito através de uma comparação entre o erro do desvio padrão das profundidades em momentos diferentes, caso um momento se mostre mais preciso ele substitui a profundidade do anterior (HOLMAN *et al.*, *op. cit.*).

3.5. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO

3.5.1. Descrição do Modelo

O modelo SWASH (*Simulating WAVes till SHore*) foi proposto com o objetivo de prever as transformações de ondas de superfície e correntes com alta variabilidade em águas rasas das zonas costeiras (ZIJLEMA *et al.*, 2011). As equações governantes desse modelo tridimensional não-hidrostático, são equações não lineares de águas rasas incluindo equações de pressão não hidrostática (ZIJLEMA *et al.*, *op. cit.*).

O modelo SWASH foi inicialmente utilizado em simulações de propagação de ondas e simulação de inundações utilizado em construções e gerenciamento costeiro (ZIJLEMA *et al.*, 2011). Porém, o modelo SWASH se mostrou eficiente para calcular características da zona costeira, como o *runup* (GUIMARÃES, 2014) ou correntes longitudinais (ZHANG *et al.*, 2018; MULLIGAN *et al.*, 2019).

O SWASH considera a conservação de massa de água e *momentum* para resolver as equações, por essa razão este modelo é eficaz para calcular corretamente a propagação da onda após sua quebra e a energia dissipada pela mesma (ZIJLEMA *et al.*, 2011). O maior benefício desse tipo de modelo é a resolução individual da propagação de ondas computando mudanças do nível d'água e correntes geradas pelas ondas, proporcionando melhores resultados em regiões pequenas com alta influência de ondas, como as zonas de surfe (MULLIGAN *et al.*, 2019).

3.5.2. Configurações dos cenários

Nesse estudo foram realizadas configurações distintas para dois cenários, com uma simulação para cada hora do percurso do derivador selecionado (8, 9, 10, 11 horas), totalizando 8 simulações (4 simulações para cada cenário). Para configuração do cenário 1, tem-se dois dados de entrada: a grade batimétrica e a assimilação do espectro das ondas para o momento exato em que o derivador foi lançado. Para configuração do cenário 2, foi acrescido aos dados de entrada do cenário 1 as velocidades das correntes iniciais do ambiente.

A duração do tempo das 4 simulações de cada modelo foi determinada de acordo com o tempo total do derivador na zona de surfe, com intuito de representar as correntes longitudinais neste período. Adicionou-se 5 minutos no tempo da simulação, visando atingir a estabilidade do cenário 1 que inicia todo seu processo de forma estacionária.

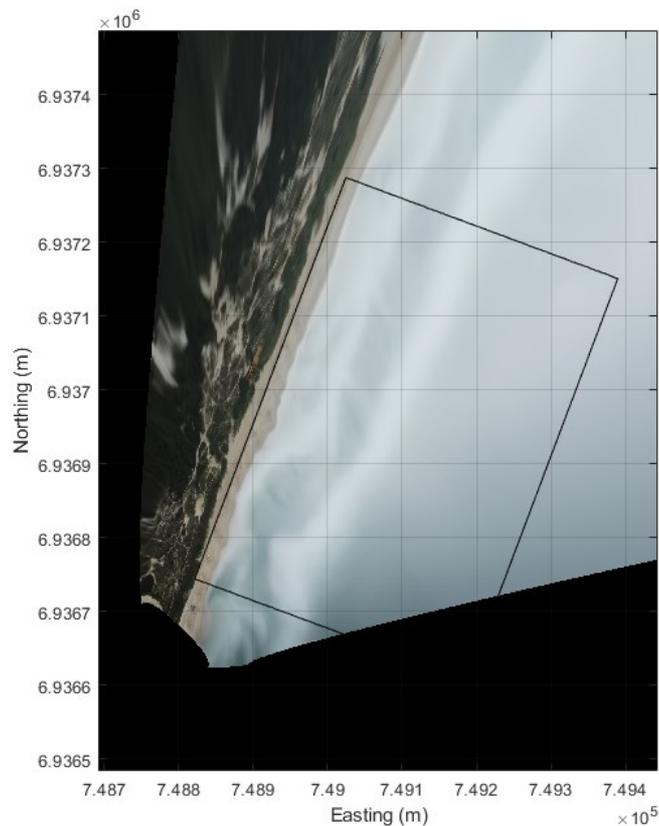
O tempo de cada derivador e conseqüentemente de cada simulação é apresentado na Tabela 2

Tabela 2. Tempo de cada simulação

Nº Indicador da Simulação	Hora inicial do derivador	Hora final do derivador	Tempo total do derivador na água (tempo)	Tempo total da simulação (derivador + 5min)
1	08:01:31	08:16:29	00:14:58	19:58
2	09:24:26	09:32:32	00:08:06	13:06
3	10:00:01	10:45:02	00:45:01	50:01
4	11:20:11	11:40:08	00:19:57	24:57

Após a determinação do tempo de processamento uma grade regular, necessária no modelo SWASH, foi gerada. Definindo uma grade regular com três barreiras abertas (oceano) e uma barreira fechada (praia), um tamanho de 390 x 580 metros com uma resolução de 1,5 metros no eixo x e 1,7 metros no eixo y (Figura 14). A grade computacional foi confeccionada com estas propriedades com o objetivo de abranger a área da batimetria calculada pelo método explicado no item 3.3.3.

Figura 14. Grade do Swash sobre imagem Timex.



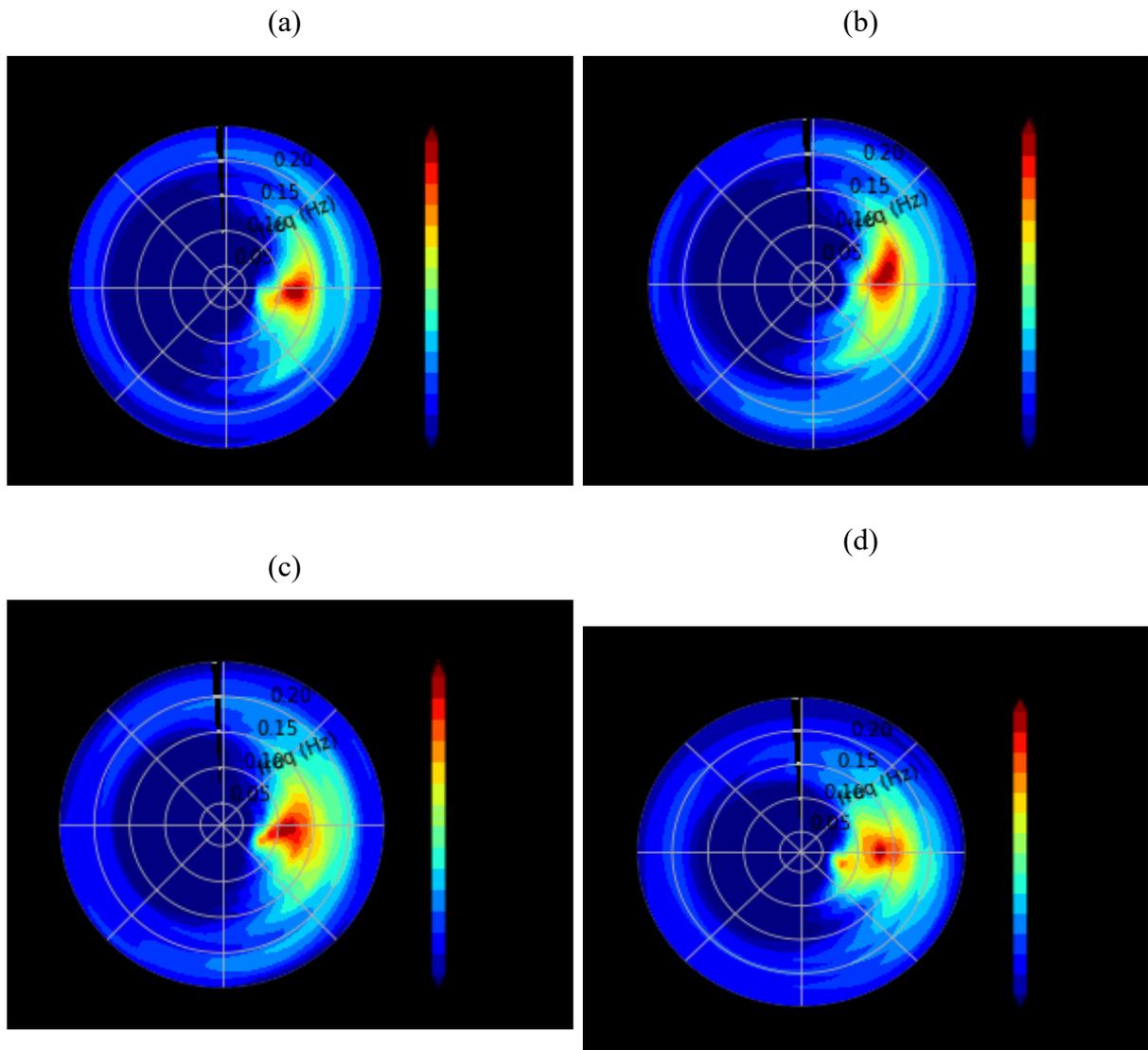
Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

A batimetria do modelo foi adquirida a partir da interpolação dos dados da batimetria inversa adquiridos pelos algoritmos do *cBathy* (item 3.3). É importante ressaltar que houve uma redução na grade regular em relação a grade da batimetria inversa, com o objetivo de eliminar a deformação da profundidade das bordas.

Depois que a grade regular SWASH e a grade batimétrica foram selecionadas, foi necessário organizar o restante dos dados de entrada utilizados. Os espectros das ondas foram calculados para cada simulação usando o espectro de energia e o espectro direcional. Ambos espectros foram adquiridos usando o ADCP fundeado fora da zona de surfe durante o experimento de campo. Cada simulação possui um tempo inicial distinto, que coincide com a hora em que o derivador foi lançado ao mar, por isso decidiu-se utilizar um espectro específico para hora do lançamento.

Os espectros de onda foram formatados para terem 48 frequências variando de 0,02 Hertz a 0,49 Hertz variando 0,01 Hertz entre cada frequência e 90 direções variando 4 graus entre 0 e 360 graus. Uma descrição de cada espectro e sua duração, bem como o próprio espectro é apresentada na Figura 15.

Figura 15. Espectro direcional utilizado para cada simulação. Primeira simulação (08:00hr); (b) Segunda simulação (09:00hr); (c) Terceira simulação (10:00hr); (d) Quarta simulação (11:30min).



Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

O espectro das 8 horas (Fig. 15a) apresenta ondas incidentes de leste, variando de 0,05 a 0,20 de hertz de frequência, com picos de energia de 0,326 m²/Hz/graus. O das 9 horas (Fig. 15b) apresenta ondas de leste, variando de 0,10 a 0,15 de hertz de frequência, com energia de 0,484 m²/Hz/graus. O das 10 horas (Fig. 15c) indica ondas de leste, variando de 0,05 a 0,20 de hertz de frequência, com energia de 0,554 m²/Hz/graus. O último espectro das 11:30 min apresenta (Fig. 15d) ondas de leste e sudeste, variando de 0,02 a 0,20 de hertz de frequência, com energia de 0,449 m²/Hz/graus.

Para cada simulação houve uma confirmação do espectro de ondas, verificando a relação do nível médio da água da simulação com a altura significativa das ondas coletadas pelo ADCP. Esse processo possibilitou validar se o modelo estava representando corretamente as características das ondas para aquela hora naquele local. Além disso, no momento inicial de cada simulação foi determinado o nível do mar (Tabela 3).

Tabela 3. Comparação do valor de altura significativa calculado pelo modelo e o valor adquirido pelo ADCP e o nível do mar inicial (T=0 após 5 minutos) para cada simulação

Simulação	HSig		Nível do mar
	Modelo	ADCP	
1	1,59	1,58	0,45
2	1,70	1,58	0,42
3	1,42	1,51	0,45
4	1,50	1,45	0,44

Para o cenário 2, além dos passos anteriores, foi gerado uma malha para velocidade inicial das correntes no ambiente. A malha da velocidade foi elaborada a partir dos vídeos utilizados para calcular a batimetria.

A matriz com as velocidades iniciais das correntes, utilizadas no cenário 2, foi adquirida a partir da metodologia proposta pelo trabalho de pesquisa de Thielicke e Stamhuis (2014). Essa metodologia é composta por três passos: imagem pré-processamento, avaliação de imagens e pós processamento.

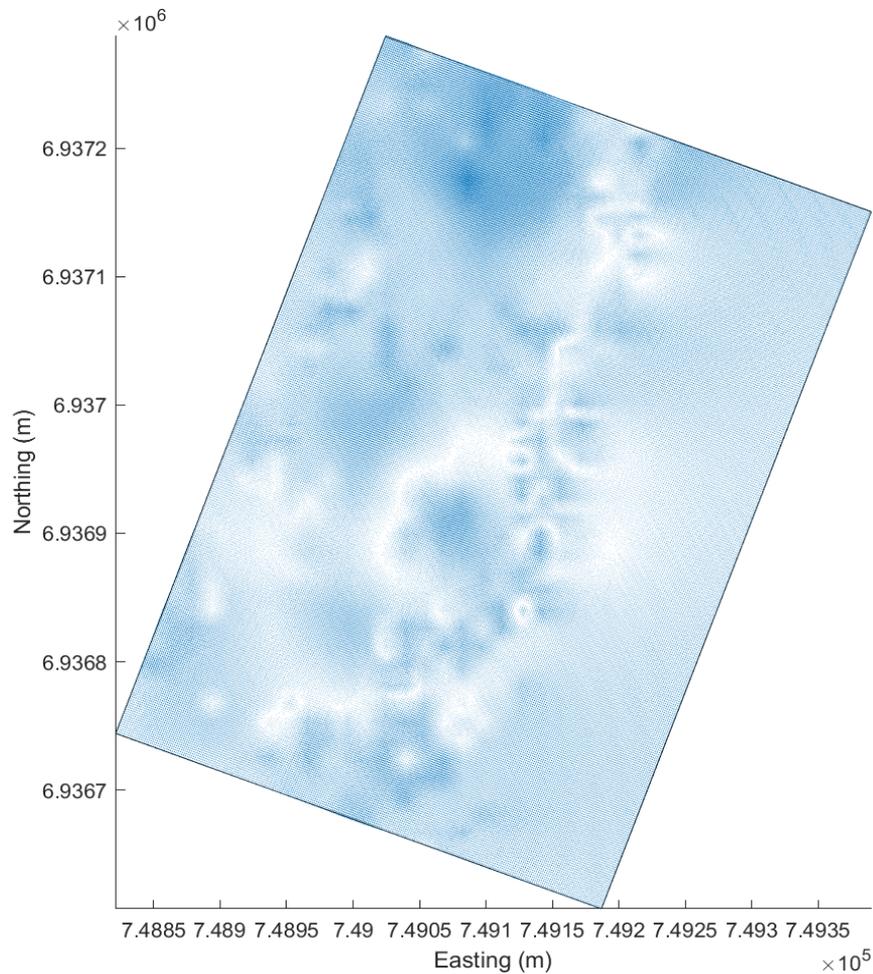
O pré-processamento têm como objetivo melhorar a qualidade das medições utilizando técnicas como: equalização do histograma das imagens, melhorando a visualização das imagens otimizando áreas com baixa e alta exposição; filtros de intensidade, que conservam a informação da iluminação das partículas considerando apenas as maiores frequências e aplicando um limite de intensidade, limitando os possíveis impactos negativos de modificações das imagens.

A avaliação de imagens é a parte mais sensível do método. Nesta etapa as imagens são correlacionadas procurando identificar as partículas que sofreram deslocamento dentro da área de interesse O método sobrepõe imagens uma sobre a outra identificando o deslocamento de cada partícula identificando a velocidade do deslocamento.

O último passo é pós processamento realizado com intuito de aumentar o nível de confiança dos resultados, usando técnicas estáticas como: remoção de valores espúrios, interpolação dos resultados para eliminar dados faltantes e redução de ruído dos resultados.

Neste trabalho foi necessário realizar uma interpolação das matrizes de velocidade encontrado utilizando a técnica PIV para que houvesse correspondência com a grade utilizada no modelo SWASH. A grade das velocidades iniciais compreendia uma área de aproximadamente 300x1000m com pixels de 4,5 metros resultando em uma resolução de 65x220, cuja área de estudo encontra-se inserida. Para cada simulação foi possível realizar uma matriz de velocidade (Figura 16), onde observa-se velocidades maiores na coloração azul escuro e velocidades menores nas áreas com a coloração azul claro.

Figura 16. Matriz da velocidade inicial inserida no modelo.



Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

Para cada simulação realizada, três resultados foram determinados: nível médio da água, quebra das ondas e corrente longitudinal registrada em cada passo de tempo. Neste trabalho, o passo de tempo de processamento foi definido como 0,0625 segundo para obter a melhor resolução dos resultados. No entanto, os resultados foram registrados após os 5 minutos de estabilização terem passado a uma taxa de 1 segundo.

3.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA

As simulações realizadas com o modelo SWASH foram comparadas em seis pontos distintos com os resultados de velocidade oriundos do derivador. A qualidade da simulação foi

aferida através de três parâmetros estatísticos: a média das diferenças (viés) (8), erro médio quadrático (RMSE) (9) e o *scatter index* (SI) (10) para cada uma das simulações.

$$b = \frac{1}{n} \sum (Y_i - X_i) \quad (8)$$

onde:

N = tamanho da amostra;

Y_i = valor calculado pelo modelo;

X_i = valor real;

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (Y_i - X_i - b)^2} \quad (9)$$

onde:

N = tamanho da amostra;

Y_i = valor calculado pelo modelo;

X_i = valor real;

b = viés;

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{X}} \quad (10)$$

onde:

$RMSE$ = erro quadrático médio;

\bar{X} = média dos valores amostrados;

Bryant *et al.* (2016) determinou a viabilidade de utilizar esses três parâmetros estáticos para avaliar a performance de modelos de previsão de ondas como o WAVEWATCH. Araújo (2016) avaliou a performance dos seus modelos SWASH em comparação a ensaios laboratoriais utilizando os mesmos parâmetros estatísticos.

Os resultados obtidos por meio da metodologia aqui descrita são apresentados na próxima seção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados e discutidos na seguinte ordem: Batimetria Inversa, Modelo Hidrodinâmico e Análise estatística do modelo.

4.1. BATIMETRIA INVERSA

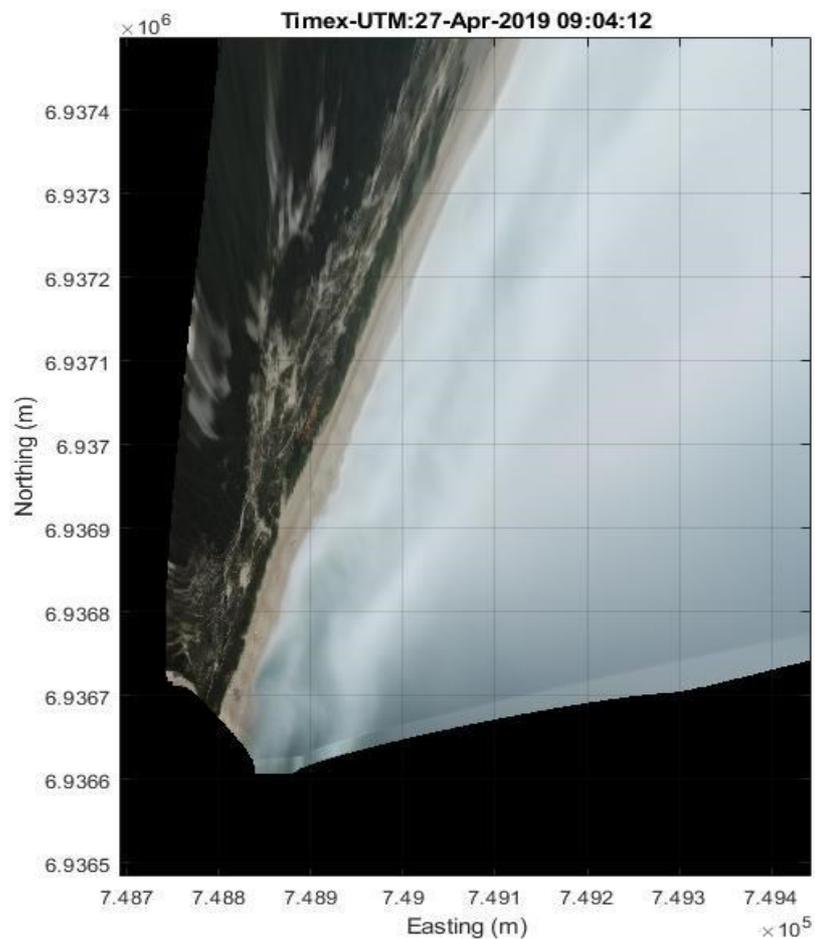
Após a fragmentação dos vídeos em quadros, com as imagens oblíquas (Figura 17), os mesmos foram retificados permitindo a análise do comportamento da onda ao longo dos 17 minutos de cada vídeo.

Figura 17. Exemplo de imagem oblíqua extraída do vídeo da área de estudo.



Uma vez que as imagens foram retificadas e georreferenciadas foi possível criar imagens média de longa exposição, conhecida como *Timex* (Figura 18), para o dia 27 de abril às 9 horas. Essa imagem possibilita uma breve análise da morfodinâmica da praia.

Figura 18. Imagem de longa exposição retificada para às 9:00 horas da manhã



Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

Na imagem *timex* (Fig. 18) é possível observar feições morfológicas distintas. As áreas brancas na zona de surfe são espumas geradas devido à quebra da onda. Ondas arrebentam quando a sua parede de água se torna instável verticalmente, onde as velocidades da crista mantêm-se a uma velocidade superior à da cava das ondas que desacelera ao entrar em contato com o fundo. Portanto, a quebra de onda indica menores profundidades, sendo utilizada como um *proxy* da presença de bancos de areia. Seguindo essa lógica, áreas de coloração mais escura na imagem indicam profundidades maiores, onde ocorrem as cavas longitudinais e os canais das correntes de retorno.

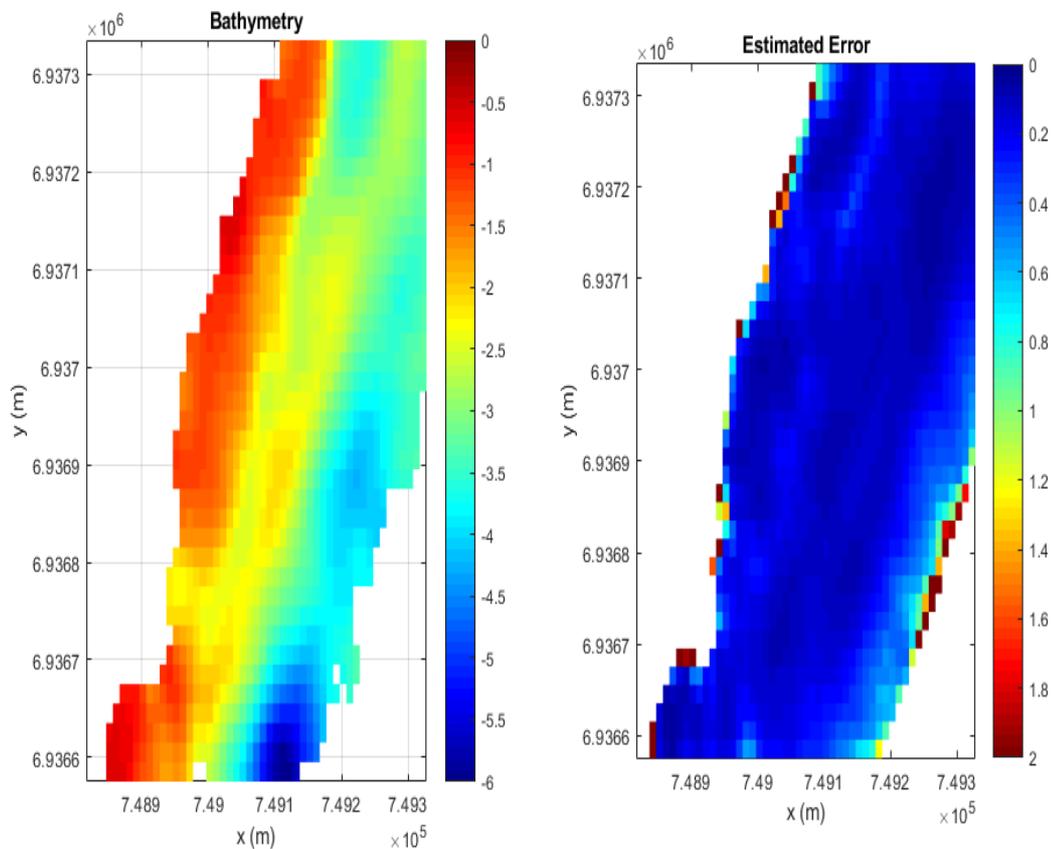
Portanto, conclui-se pela Figura 18 a presença de dois bancos de areia longitudinal (áreas brancas na zona de surfe da imagem) com uma cava longitudinal separando os bancos

(áreas escuras na zona de surfe da imagem). O primeiro banco de areia (banco interno) está iniciando aproximadamente na coordenada 748950,0 E e 6936750,0 N enquanto o segundo banco (banco externo) está consolidado junto à praia, na coordenada 748920,0 E e 6936940,0 N. Também se pode observar uma cava longitudinal entre esses bancos e um canal de corrente de retorno iniciando no mesmo plano da coordenada (748890,0 E 6936750,0 N).

Torronteguy (2002) analisou 5 perfis no sistema da Joaquina, classificando a praia do Campeche utilizando o esquema proposto por Wright e Short (1984) como um estágio intermediário denominado banco-cava longitudinal. Essa classificação também se aplica ao presente trabalho como observado na Figura 18.

A partir das imagens retificadas, e utilizando o algoritmo do *cBathy* foi determinado a batimetria da área do estudo (Figura 19a).

Figura 19. (a) Batimetria determinada utilizando o *cBathy* e (b) Erro máximo de cada elemento da batimetria calculada utilizando *cBathy*.



Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

A batimetria calculada indica as mesmas feições morfológicas previamente identificadas na imagem de longa exposição (Fig.18) de forma qualitativa. A cota de -1,5 metros de profundidade representa a crista do primeiro banco de areia, e a cota de -2,5 metros segue a região mais profunda antes do segundo banco de areia.

Ao calcular a batimetria utilizando o algoritmo do *cBathy* foi obtido também o erro para cada um dos elementos da matriz (Figura 19b). O erro da batimetria calculada apresentou uma amplitude de 0 a 2 metros e erro médio de 0,2 metros, valor similar a literatura. Para confecção da batimetria final (Figura 19a), todos os elementos que apresentaram erros superiores a 0,5 foram zerados eliminando os valores calculados. Ressalta-se que os maiores erros foram observados na borda da matriz utilizada e em regiões de água rasas.

Holman *et al.* (2013) testou o algoritmo do *cBathy* em duas praias: Duck na Carolina do Norte, apresentam valores de erro médio variando de 0,19 metros a 0,51 metros ao longo de dois anos e Agate Beach atingem valores de erro médio variando de 0,56 metros. Além disso os autores ressaltaram que os maiores erros ocorrem próximo à costa devido ao aumento de ruído das imagens nessas regiões.

VOS (2017) avaliou a batimetria da praia de Narrabeen-Collaroy na Austrália durante três voos com alturas de ondas variando entre 1 a 3 metros de altura e obtendo valores de erro médio de 0,40 metros, 0,35 metros e 0,72 metros, respectivamente. Confirmando a capacidade do *cBathy* de estimar a profundidade local até 10 metros em ambientes com a presença de ondas moderadas ($H_s = 2,5$ metros).

4.2. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO

As simulações realizadas com o modelo SWASH foram comparadas em seis pontos diferentes com os resultados de velocidade do derivador, e calculando a velocidade média da corrente longitudinal para cada simulação e cenário (Tabela 4). Além disso, será apresentado o último intervalo de tempo elevação da superfície e o percentual médio de quebra de onda ocorrido considerando todos os intervalos de tempo para o cenário 2.

Tabela 4. Velocidade da corrente longitudinal obtida pelo derivador e modelo numérico (Cenário 1 e Cenário 2) para os 6 pontos analisados

Simulação	Pontos	Dados Real V_Derivador	Dado Estimado 1 Modelo (Bat-Onda)	Dado Estimado 2 Modelo (Bat-Onda - Vel)
1	1	1,64	0,379	0,382
	2	1,12	0,276	0,279
	3	0,96	0,606	0,614
	4	1,09	0,352	0,354
	5	0,72	0,632	0,639
	6	0,45	0,679	0,673
	Média	1,00	0,49	0,49
2	1	0,73	1,259	1,243
	2	0,87	0,233	0,901
	3	1,06	0,067	0,876
	4	1,15	1,024	0,824
	5	1,20	0,653	0,528
	6	1,41	0,843	0,555
	Média	1,07	0,68	0,82
3	1	0,18	0,43	0,42
	2	0,75	0,41	0,4
	3	1,18	0,89	0,71
	4	1,40	0,67	0,87
	5	1,68	0,56	0,64
	6	2,87	0,72	0,77
	Média	1,34	0,61	0,64
4	1	0,42	0,40	0,38
	2	0,51	0,42	0,55
	3	0,12	0,82	0,69
	4	0,66	0,40	0,36
	5	0,73	0,32	0,3
	6	1,02	0,65	0,61
	Média	0,58	0,50	0,48

Os valores das correntes litorâneas em pontos distintos ao longo da área de estudo medidos pelo derivador variaram entre 0,12 m/s a 2,87 m/s sendo que a velocidade média da velocidade da corrente longitudinal foi de 1,00 m/s, 1,07 m/s, 1,34 m/s, 0,58 m/s para as simulações 1,2,3 e 4, respectivamente. Os modelos numéricos calcularam valores de velocidade da corrente longitudinal entre 0,49 m/s a 0,68 m/s para o cenário 1 e 0,48 m/s a 0,82 m/s para o cenário 2.

De um modo geral, praias arenosas de bancos múltiplos, em diferentes costas, apresentam valores de intensidade da corrente longitudinal semelhantes aos calculados pelos modelos.

No litoral do Rio Grande do Sul observam-se valores das correntes longitudinais entre 0,07 a 0,8, no litoral norte (Toldo *et al.*, 1993). Enquanto na praia do Mar Grosso, litoral sul, os valores variam entre 0,2 e 0,6 m/s (Alvarez *et al.*, 1981). Castelle e Bonneton (2002) observaram velocidades da corrente longitudinal entre 0,05 e 1,2 m/s em uma praia na França com classificação morfodinâmica intermediária e incidência de ondas de 1 a 1,3 metros.

Longuet-Higgins (1970) considerou a altura e o ângulo de incidência das ondas como as principais variáveis condicionantes da formação e propagação das correntes, não incluindo componentes do vento. Os dados do presente trabalho mostram que as correntes longitudinais mais intensas foram obtidas na simulação 2, associada as maiores alturas de ondas.

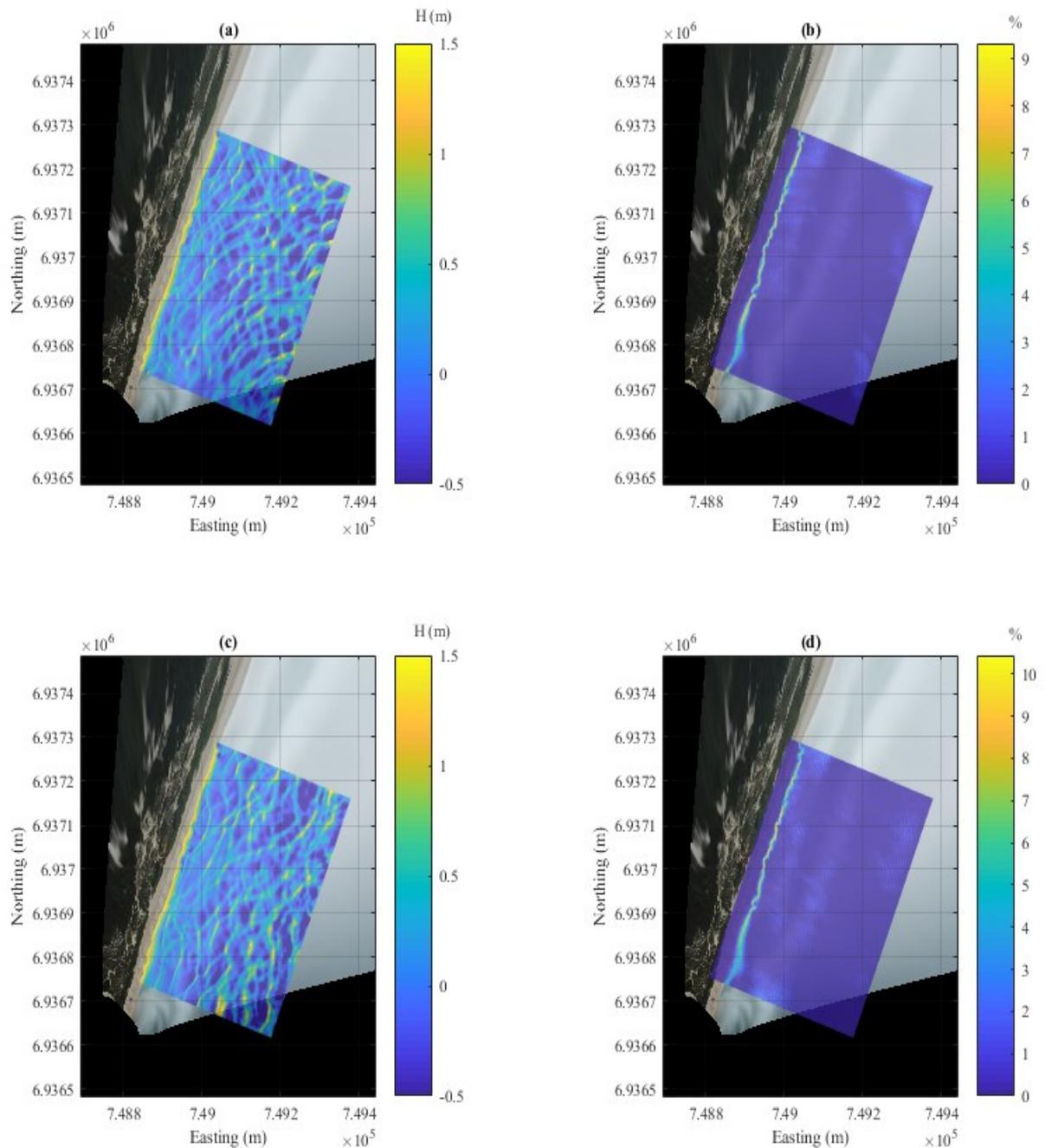
Os resultados do último passo de tempo para as primeiras duas simulações são mostrados na Figura 20. A Figura 20 (a) mostra que a elevação da superfície não ultrapassa 1,5 m, o que condiz com as alturas significativas das ondas registradas em campo pelo ADCP (Tabela 3). Além disso, na região onde observasse o canal da corrente de retorno, a altura das ondas é menor do que no restante da simulação. Isso ocorre porque em áreas de corrente de retorno há uma profundidade maior, diminuindo a interação entre as ondas e o fundo e consequentemente diminuindo o empilhamento das ondas, diminuindo sua altura (DAVIDSON-ARNOTT, 2010).

Na Figura 20(b) observa-se que na posição dos bancos de areia, visualizados na imagem *timex* (área branca), a probabilidade de quebra de onda é maior. Esta conferência de uma maior probabilidade de arrebentação da onda com a posição da barra indica o efeito da batimetria no modelo.

Os resultados do nível da superfície da água e o percentual médio de probabilidade de arrebentação da segunda simulação são mostrados na Figura 20 (c) e (d), onde a elevação da superfície não ultrapassa 1,5 m, como na simulação anterior. No entanto, observa-se uma diminuição da elevação da superfície, que coincide com a quebra das ondas no ponto exato de contato entre a onda e o primeiro banco de areia. A altura média das ondas, quando comparada ao resto da simulação, diminui entre o primeiro banco (ou banco interno) e o segundo banco (ou banco externo). Esse padrão pode ser confirmado ao observar a porcentagem média de

ocorrência das ondas quebrando. Na 2ª simulação, observa-se que a porcentagem média de rebentação ocorrida é maior na barra de areia offshore.

Figura 20. Resultados da elevação da superfície no último passo de tempo e da porcentagem média da probabilidade de quebra de onda, para primeira simulação (a) e (b) e para a segunda simulação ((c) e (d))



Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

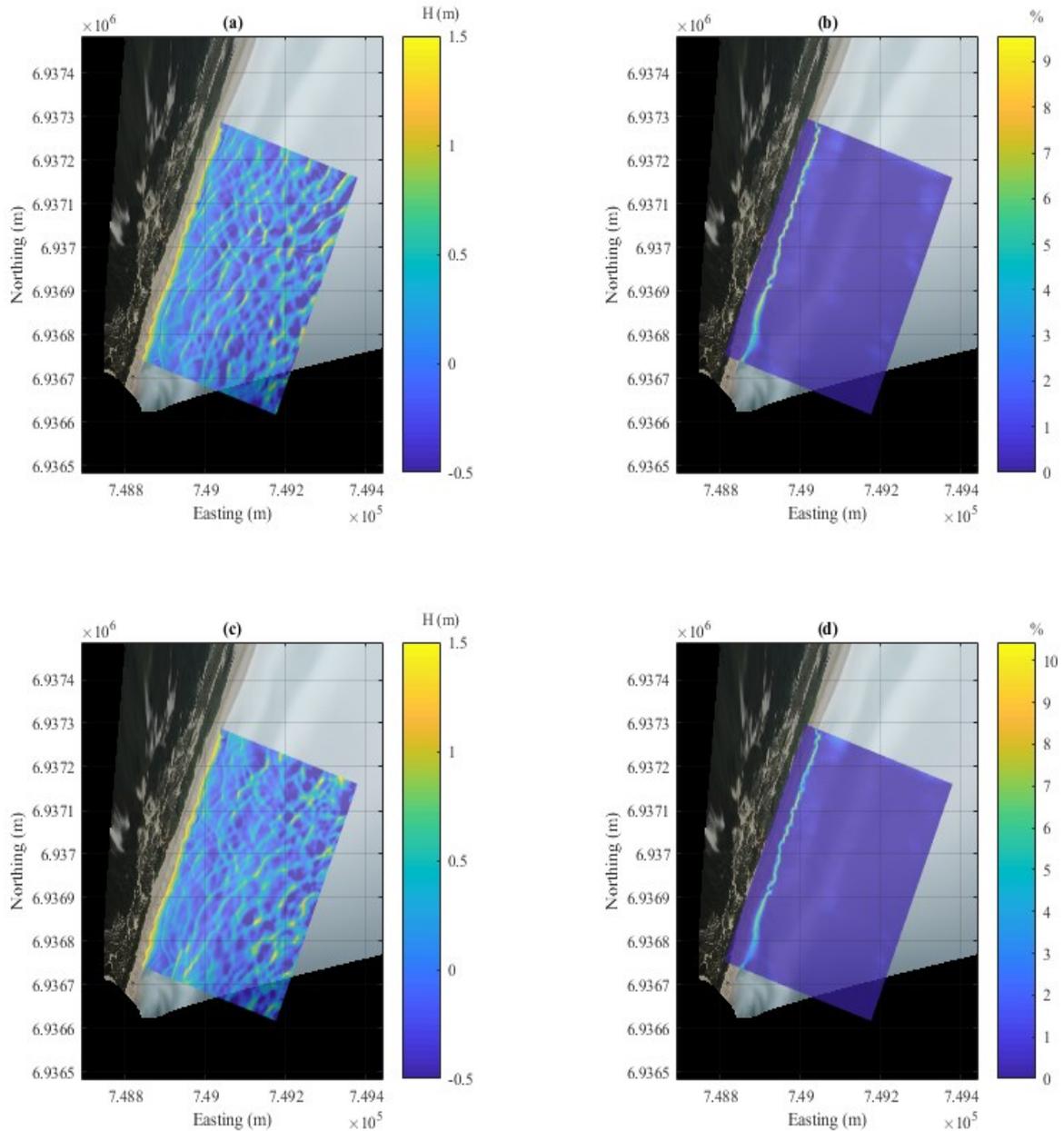
Na terceira simulação Figura 21 (a) e (b) a elevação da superfície novamente não ultrapassa 1,5 m. Porém, nesta simulação as ondas que estão atingindo a praia possuem um ângulo entre 45° em relação à costa. A porcentagem média de quebra de onda que ocorre é maior na posição dos bancos de areia do que no restante da simulação, tanto para o banco interno quanto para o banco externo.

A porcentagem média da probabilidade de quebra de onda está mais elevada na posição dos bancos de areia do que no restante da simulação, tanto para o banco soldado à costa como para o banco mais afastado. Essa conferência entre a maior probabilidade de quebra de onda com a posição do banco de areia reforça a boa acurácia da batimetria do modelo.

Os resultados do nível da superfície da água e a porcentagem média da probabilidade da quebra de onda da quarta simulação, do cenário 2, podem ser observados na Figura 21 (c) e (d). É possível observar que a elevação da superfície não ultrapassa 1,5 m, como nas simulações anteriores. Também se nota padrões muito similares à segunda simulação, ocorrendo a mesma queda do nível do mar após o banco de areia mais afastado. No entanto, ao contrário da segunda simulação, não se pode observar este padrão da probabilidade de quebra de onda.

Segundo a teoria da tensão de radiação, alturas de ondas maiores e o ângulo de incidência mais próximo a 45 graus indicam um aumento da intensidade da velocidade das correntes longitudinais (ASHTON e MURRAY, 2006). Atingindo um valor máximo de velocidade na zona de arrebentação, a partir de onde decrescem (WRIGHT, 1985 *apud* JUNG, 2010). Esse padrão pode ser observado no presente trabalho, onde as maiores velocidades foram calculadas na simulação 2 (Figura 20c) e simulação 3 (Figura 21a), que apresentam ondas com incidências de 45 graus e alturas significativa de 1,70 e 1,42, respectivamente.

Figura 21. Resultados da elevação da superfície no último passo de tempo e da porcentagem média da probabilidade de quebra de onda, para terceira simulação (a) e (b) e para a quarta simulação ((c) e (d))

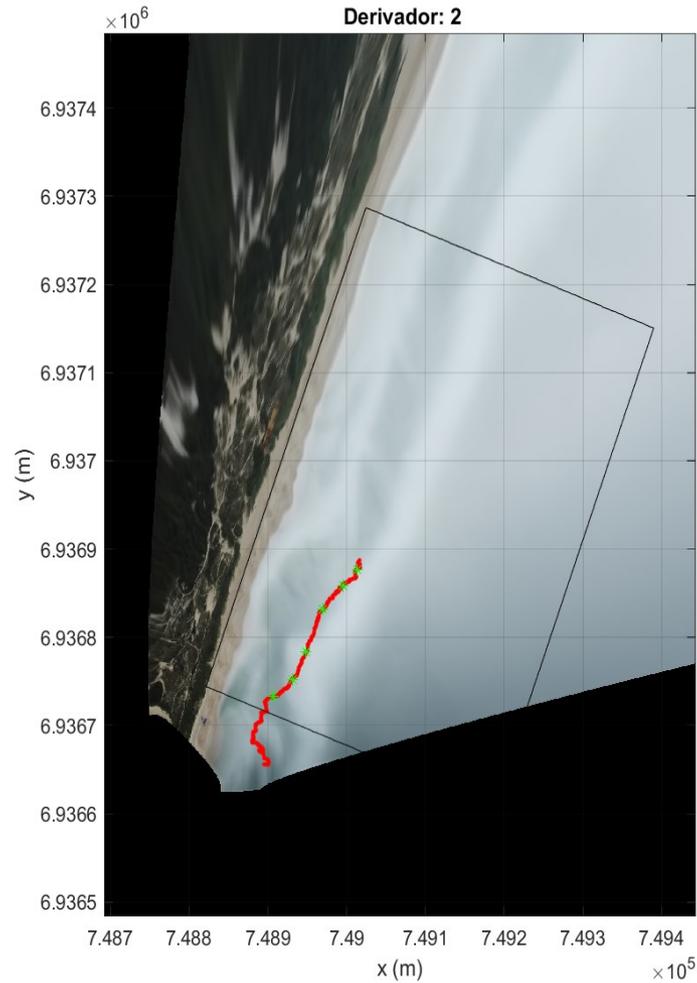


Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos foram comparados em seis pontos diferentes para cada simulação. Os pontos foram selecionados ao longo da trajetória do derivador (Figura 22), comparando a velocidade do derivador naquele ponto com a do modelo.

Figura 22. Trajeto do derivador em vermelho, pontos selecionados para análise em verde



Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

A qualidade dos cenários foi verificada com três parâmetros estatísticos: a média das diferenças das velocidades médias (m/s) das correntes longitudinais (Viés) erro médio quadrático (RMSE) e o *scatter index* (SI), considerando cada simulação e cada cenário do modelo. Os resultados das análises são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados da análise estatística do modelo. Destacado em vermelho o menor índice de dispersão, indicando o modelo com melhor desempenho.

Simulação	Viés 1	Viés 2	RMSE 1	RMSE 2	Índice de Dispersão 1	Índice de dispersão 2
1	-0,51	-0,51	0,71	0,71	71,38%	71,09%
2	-0,39	-0,25	0,62	0,51	75,09%	47,92%
3	-0,73	-0,70	1,05	1,01	78,47%	75,34%
4	-0,08	-0,09	0,38	0,36	66,36%	62,03%

Ao analisar o viés para todas as simulações e para os dois cenários se verifica uma subestimação das intensidades das velocidades das correntes por parte do modelo. Uma hipótese que explica essa subestimação é o modelo não levar em consideração a componente de vento. Hubertz (1986) mostrou uma relação direta entre a velocidade do vento e a intensidade da corrente, ou seja, com o aumento da velocidade do vento há intensificação da corrente, e com a desaceleração do vento, diminuição de sua velocidade.

Outro fator que pode influenciar a análise estatística é o tamanho amostral pequeno e a curta série temporal dos dados de ondas avaliado neste trabalho, sendo necessários períodos maiores (ou mais períodos) para uma melhor calibração. A localização do ADCP também pode interferir na assimilação dos dados do espectro de ondas favorecendo erros e diferenças entre os valores reais e os modelados (CIRELLO, 2019).

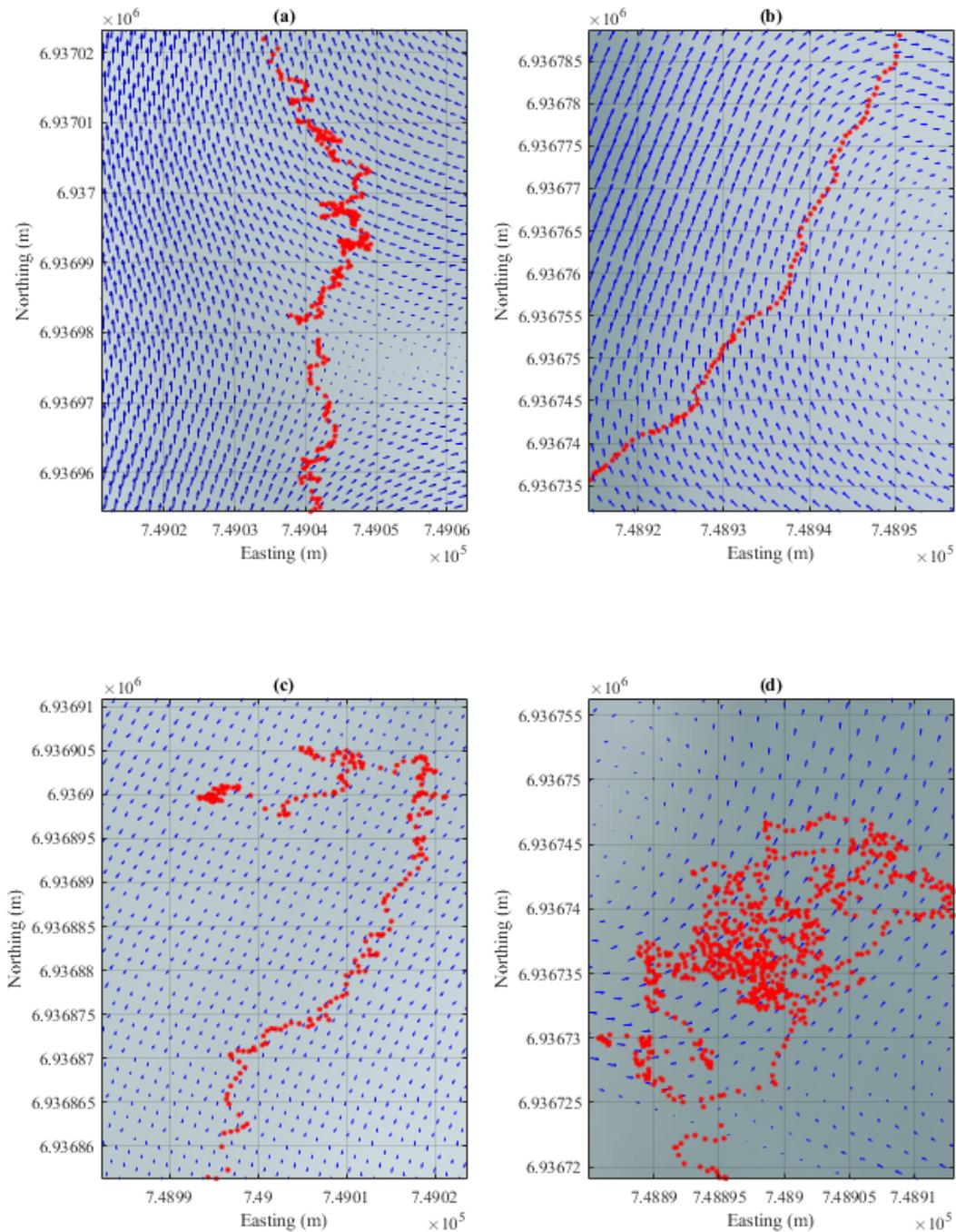
Quanto a batimetria podemos observar uma interferência na precisão do modelo. A batimetria utilizada para os modelos foi gerada a partir das imagens do vídeo capturado as 9:00. Ao analisar os índices de dispersão, avalia-se que o menor índice de dispersão e, portanto, mais preciso foi o da simulação 2 para o cenário 2, que utilizou as informações de onda e velocidade correspondente ao mesmo horário da batimetria.

Autores como Ruessink *et al.* (2001), Zhang *et al.* (2018) e Mulligan *et al.* (2019) também verificaram a influência da batimetria na precisão do modelo, concluindo que modelos com batimetrias mais detalhadas afetam positivamente os modelos.

A direção da velocidade dos cenários foi verificada qualitativamente (Figura 23). Pode-se observar que a corrente longitudinal local, segundo o modelo, tem direção predominante para norte. Os derivadores também indicam uma corrente longitudinal em direção norte da praia.

Os diferentes trajetos registrados pelos derivadores, com momentos de fuga ou retorno à praia, ou circulante também pode ser explicado e observado nas correntes do modelo (Figura 23a). Neste caso, a corrente está “empurrando” em direção a costa. Já na Figura 23c, o derivador muda sua rota ao encontrar uma mudança da direção da velocidade das correntes longitudinais de norte para o sul.

Figura 23. Exemplos de direção dos dados de corrente oriundos do modelo (setas azuis) e da trajetória do derivador (vermelho). (a) Primeira simulação. (b) Segunda simulação. (c) Terceira simulação. (d) Quarta simulação.



Obs: Devido as configurações do software utilizado o separador decimal segue o padrão americano.

5. CONCLUSÕES

Este estudo aceita a hipótese proposta, confirmando que é possível usar uma batimetria de vídeo estimada remotamente e assimilá-la a um modelo numérico de ondas. Além disso, comprovou-se que o uso de uma batimetria mais detalhada resulta em um modelo mais preciso, indicando a possibilidade futura de caracterização do comportamento das ondas, correntes litorâneas, correntes de retornos e outros processos oceanográficos de águas rasas, apesar da dificuldade de obtenção de dados batimétricos *in-situ*.

A batimetria gerada variou entre 0 e 6 metros, apresentando um erro médio de 0.2 metros, estimando corretamente a presença de dois bancos de areia, um externo e outro interno, por sua vez, os bancos de areia afetaram diretamente os resultados da simulação como esperado. A maior porcentagem média de quebra de onda coincide com a posição dos bancos de areia.

Os modelos numéricos da Praia do Campeche apresentaram valores de velocidade da corrente longitudinal entre 0,49 m/s a 0,68 m/s para o cenário 1 e 0,48 m/s a 0,82 m/s para o cenário 2 condizentes com a literatura. Porém, ao comparar os cenários deste estudo com os valores coletados em campo utilizando derivadores nota-se uma subestimação em relação às intensidades das velocidades das correntes longitudinais devido à falta de dados de vento.

As maiores velocidades foram calculadas na simulação 2 e simulação 3, que apresentam ondas com incidências de 45 graus e alturas significativa de 1,70 e 1,42, respectivamente, exemplificando a teoria da tensão de radiação, onde alturas de ondas maiores e o ângulo de incidência mais próximo a 45 graus indicam um aumento da intensidade da velocidade das correntes longitudinais.

Através do uso dos modelos numéricos foi possível descrever o padrão das correntes longitudinais ao longo de toda a zona de surfe incluindo o padrão e comportamento da corrente ao longo dos bancos de areia. Concluindo uma corrente longitudinal com direção predominante para norte na praia do Campeche.

Utilizando ferramentas estatísticas determinou-se que o modelo que considera a batimetria, espectro de ondas e velocidade inicial da corrente longitudinal teve os melhores resultados.

6. RECOMENDAÇÕES

O presente estudo indica uma capacidade de utilizar dados de ambientes coletados remotamente para desenvolver modelos numéricos precisos. Por sua vez, a ferramenta de modelagem numérica é amplamente utilizada para avaliar e compreender processos costeiros de uma área de interesse. Porém, existem diversos estudos que podem ser realizados para aperfeiçoar a metodologia empregada.

Por exemplo, futuros trabalhos na praia do Campeche devem levar em consideração a influência do vento sobre as correntes longitudinais na zona de surfe. Também recomenda-se utilizar um equipamento diferente para análise da precisão do modelo, uma vez que os derivadores medem a velocidade instantânea da velocidade.

Quanto à batimetria recomenda-se utilizar sempre a resolução 4K para os vídeos capturados por VANT, uma vez que resoluções menores podem impedir a retificação e georeferenciamento das imagens possibilitando a geração da batimetria utilizando o cBathy.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, H.; BAILLY, J. S.; BAGHDADI, N. N.; SAINT-GEOURS, N.; FABRE, F. Potential of Space-Borne LiDAR Sensors for Global Bathymetry in Coastal and Inland Waters. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE**, v. 6, p. 202 - 216, 2013.

ABILEAH, R.; TRIZNA, D. B.; Shallow water bathymetry with an incoherent X-band radar using small (smaller) space-time image cubes. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, 2010.

ALMAR, R.; BERGSMA, E. W. J; THOUMYRE, G.; BAB, M. W.; CESBRON, G.; DALY, C.; GARLAN, T; LIFERMANN, A.; Global Satellite-Based Coastal Bathymetry from Waves. **Remote Sensing**, v 13, p.4628, 2021.

ALVAREZ, J.A.; GRÉ, J.C. & TOLDO Jr., E.E. Estudos da praia a nordeste do molhe de Rio Grande – Rio Grande do Sul. **Pesquisas**, Porto Alegre, v. 14, p. 131-147, 1981.

ARAÚJO, C.E.S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F.; Wave Regime Characteristics of the Southern Brazilian Coast. In: Copedec VI International Conference On Coastal and Port Engineering in Developing Countries, v. 6, **Proceedings...**, Colombo, Sri Lanka, pp. 1- 15, 2003.

ARAÚJO A. R. E. **Modelação não linear e não hidrostática de ondas de superfície em fundos de variação rápida - Modelo SWASH** 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Técnico de Lisboa, Lisboa, 2016.

ARAÚJO, R.V.; PEREIRA, P.S.; LINO, A.P.; ARAÚJO, T. M.; GONÇALVES, R. M. Morphodynamic study of sandy beaches in a tropical tidal inlet using RPAS. **Marine Geology**, v. 438, p.106540, 2021.

ASHTON, A.D.; MURRAY, A. B. Delta Simulations Using a One-Line Model Coupled with Overwash. **Coastal Dynamics**, Barcelona, set. 2006

ASSIREU, A. T.; STEVENSON, M. R.; STECH, J. L. Surface Oceanic Circulation along the S-SE Coast of Brazil, obtained by Sattlite Tracked Drifters. **Continental shelf Research**, [s.l.], v. 23, n.2, p. 147-157, 2003

BADRU, G. S.; ODUNUGA, S. S.; OMOJOLA, A. S.; OLADIPO, E. O. Numerical modelling of sediment transport in southwest coast of Nigeria: Implications for sustainable

management of coastal erosion in the Bight of Benin. **Journal Of African Earth Sciences**, Lagos, v. 187, mar. 2022.

BIRKEMEIER, W. A.; MASON, C. The Crab: a unique nearshore surveying vehicle. **Journal Of Surveying Engineering**, Duck, v. 110, n. 1, p. 1-7, mar. 1984.

BOSBOOM, J.; STIVE, M. J. F.; **Coastal Dynamics**. TU Delft, 2011.

BRYANT, M. A.; HESSER, T. J.; JENSEN, R. E Evaluation Statistics Computed for the Wave Information Studies (WIS). **US Army Corps of Engineers**, jul. 2016.

CASTELLE, B., BONNETON, P., 2002. Wave-induced currents over the Aquitanian Coast sand bars. In: 8th International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay.

CASTELLE, B., BONNETON, P., SÉNÉCHAL, N., DUPUIS, H., BUTEL, R., MICHEL, D.; Dynamics of wave-induced currents over an alongshore non-uniform multiple-barred sandy beach on the Aquitanian Coast, France. **Continental Shelf Research**, v. 26, p. 113-131, 2005.

CHUANG, L. Z. H.; WU, L. C.; SUN, Y. D.; LAI, J. W.; Bathymetry Determination Based on Abundant Wavenumbers Estimated from the Local Phase Gradient of X-Band Radar Images. **Remote Sensing**, v. 13, p. 4240, 2021

CHUN, H; SUH, K. Analysis of Longshore Currents with an Eulerian Nearshore Currents Model. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 336, p. 1352-1366, nov. 2017.

CIRELLO, Fernanda. **Influência das ondas de infragravidade no processo de transposição sedimentar no promontório entre as praias Brava e Ingleses, norte da Ilha de Santa Catarina, SC**. 2019. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

DAHMANI, A.; MEZOUAR, K.; CHERIF, Y. S.; SALLAYE, M. Coastal processes and nearshore hydrodynamics under high contrast wave exposure, Bateau-cass'è and Stamboul coasts, Algiers Bay. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. Algeria, v. 205, p.107-169, 2021

DALRYMPLE, R. A; DEAN, R. G. **Coastal Processes with Engineering Applications**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, p. 489, 2004.

DAVIDSON-ARNOTT, R. **Introduction to Coastal Processes and Geomorphology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

DOBRONCHINSKI, J. P. H.; VAN DEYZEN, A.; ZIJLEMA, M.; VAN DER HOUT, A. Combining numerical tools to determine wave forces on moored ships. **Coastal Engineering**, Holanda, v. 179, p.104-224, 2022.

FEDDERSEN F. AND GUZA, R.T.; Observations of nearshore circulation: alongshore uniformity. **Journal of Geophysical Research**, v. 180, 2003.

FERREIRA, Í. O.; A. NETO, A.; MONTEIRO, C. S. O Uso De Embarcações Não Tripuladas Em Levantamentos Batimétricos. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l], v. 68, n. 10, p. 1885-1903, 19 dez. 2016.

GRAZIOTTO, M. P. **Modelagem numérica como ferramenta para caracterizar a dispersão da pluma de um derrame de óleo em São Francisco do Sul, Santa Catarina**. 2019. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

GÜL, M.; KÜÇÜKUYSAL, C.; ÇETIN, E.; ATAYTÜR, Ö.; MASUD, A. Coastal Erosion Threat on the Kizkumu Spit Geotourism Site (SW Turkey): natural and anthropogenic factors. **Geoheritage**, Turkey, v. 12, n. 3, p. 54-68, 16 jun. 2020.

GUIMARÃES, V. P. **Avaliação numérica do comportamento das ondas durante eventos extremos na região costeira do Rio Grande do Sul** 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

JUANG, G. B. **Estrutura e Propagação de Correntes Longitudinais na Praia De Tramandaí – RS**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HARARI, J. **Fundamentos de Modelagem numérica em Oceanografia**. São Paulo: Salt | Sea & Limno Technology, 2015.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24°S 46°W). **Continental Shelf Research**, São Paulo, v. 23, n. 16, p. 1597-1613, out. 2003.

HENDERSON, C. S.; FIEDLER J. W.; MERRIFIELD, M. A.; GUZA, R.T.; YOUNG, A. P.; Phase resolving runup and overtopping field validation of swash. *Coastal Engineering*, Estados Unidos, v. 175, p.104-128, ago. 2022.

HOLLAND, T. K.; HOLMAN, R.; LIPPMANN, T. C.; STANLEY, J.; PLANT, N. G. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. **Ieee Journal Of Oceanic Engineering**, Oregon, v. 22, n. 1, p. 81-92, jan. 1997.

HOLMAN, R. A; HOLLAND, T. K. Surf zone characterization from Unmanned Aerial Vehicle imagery. **Ocean Dynamics**, [S.L.], v. 61, n. 11, p. 1927-1935, 14 jun. 2011.

HOLMAN, R. A.; BRODIE, K. L.; SPORE, N. J. Nearshore Measurements From a Small UAV. **American Geophysical Union**, Oregon, 2016.

HOLMAN, R. A.; BRODIE, K. L.; SPORE, N. J. Surf Zone Characterization Using a Small Quadcopter: technical issues and procedures. **Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, Oregon, v. 55, n. 4, p. 2017-2027, abr. 2017.

HOLMAN, R. A.; HALLER, M. C. Remote Sensing of the Nearshore. **Annual Review Of Marine Science**, Amherst, v. 5, n. 1, p. 95-113, 3 jan. 2013.

HOLMAN, R. A.; STANLEY, J. The history and technical capabilities of Argus. **Coastal Engineering**, Oregon, v. 54, n. 6-7, p. 477-491, jun. 2007.

HOLMAN, R. A.; STANLEY, J.; HALLER, T. O. Applying video sensor networks to nearshore environment monitoring. **Ieee Pervasive Computing**, Oregon, v. 2, n. 4, p. 14-21, out. 2003.

HOLMAN, R.; PLANT, N.; HOLLAND, T. CBathy: a robust algorithm for estimating nearshore bathymetry. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, Oregon, v. 118, n. 5, p. 2595-2609, maio 2013.

HORN FILHO, N. O.; LEAL, P. C.; OLIVEIRA, J. S. **Geologia das 117 praias arenosas da Ilha de Santa Catarina, Brasil: As praias de Florianópolis na ilha da magia**. Novas Edições Acadêmicas, 2014

HUANG, Y.; SHENG, Y.; MIN, X. HE, Y., CHEN P. Numeric Simulation of Suspended Sediment Transportation during Dredging of Harbor Basin. **Journal of Coastal Research**. Coconut Creek, Florida, v. 104, p. 276-280, 2020.

HUBERTZ, J.M. Observations of local wind effects on longshore currents. **Coastal Engineering**, v. 10, p. 275 – 288, 1986

KAO, H. M.; REN, H.; LEE, C. S.; CHANG, C. P.; YEN, J. Y.; LIN, T. H. Determination of shallow water depth using optical satellite images. **International Journal of Remote Sensing**, Taiwan, v.30, n. 23, p.6241-6260, 04 dec 2009.

KLEI, A. H. F., MENEZES, J. T., DIEHL, F. L., ABREU, J. G. N., POLETTE, M., SPERB, R.M., SPERB, R. C., HORN, N. Litoral Centro Norte. *In*: Dieter Muehe (Org.). **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília: MMA, p 402-412, 2006.

KLEIN, A.H.F, SHORT, A.D. **Brazilian Beach Systems**. v. 17. Switzerland: Springer, p 465–506, 2016.

LERMA, N. A., PEDREROS, R., ROBINET, A., SÉNÉCHAL, N. Simulating wave setup and runup during storm conditions on a complex barred beach. **Coastal Engineering**, v. 123, p.29–41, maio 2017.

LIPPMANN, T.; HOLMAN, R.. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. **Journal of Geophysical Research**, Oregon, v. 95, n. 7, p. 11575-11590, 11 jul. 1990.

LIN, Y. C.; CHENG, Y.T.; ZHOU T.; RAVI, R.; HASHEMINASAB, S. M.; FLATT, J. E.; TROY, C.; HABIB, A. Evaluation of UAV LiDAR for mapping coastal environments. **Remote Sensing**, Estados Unidos, v.11, n.24, p,2893, 02 dec. 2019.

LONGUET-HIGGINS, M.S. & STEWART, R.W.; Radiation stresses in water waves: a physical discussion, with applications, **Deep Sea Res.**, v. 11, p. 529-562., 1964.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. **Journal of Geophysical Research**, Oregon, v. 75, n. 33, p. 6778-6789, 20 nov. 1970.

MACMAHAN, J.; BROEN, J.; THORNTON, E. Low Cost handheld global positioning system for measuring surf zone currents. **Journal of Coastal Research**, v. 25, n.3, p. 744–754, maio 2009.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.; AZEVEDO, A. E.G. de. **Mapa geológico do quaternário costeiro dos estados do Paraná e Santa Catarina**. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988.

MASSELINK, G.; HUGHES, M.; KNIGHT, J. **Introduction To Coastal Processes & Geomorphology**. 2. ed. London: Hodder Education. p. 433, 2011

MATESE, A.; GENNARO, S. Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticult. **Scientific Reports**, Florence, v. 11, n. 1, p. 1-13, 1 fev. 2021.

MELO, T. P. G. **Comunidade de meiofauna e associações de nematoda em praias arenosas amazônicas de macromaré: variações espaciais e sazonais**. 130 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

MESELHE, E. A.; GEORGIU, I.; ALLISON, M. A.; MCCORQUODALE, J. A. Numerical modeling of hydrodynamics and sediment transport in lower Mississippi at a proposed delta building diversion. **Journal of Hydrology**, Nova Orleans, v. 472-473, p.340–354, 05 out. 2012.

MULLIGAN, A. R. P.; GOMESA, E. R.; MISELISB J. L.; MCNINCHC, J. E. Non-hydrostatic numerical modelling of nearshore wave transformation over shore-oblique sandbars. **Estuarine, coastal and Shelf Science**, v. 2019, p151-160, 2019.

ONISHI, M.; ISE, T. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. **Scientific Reports**, Kyoto, v. 11, n. 1, p. 1-15, 13 jan. 2021.

PARK, S.; CHOI, Y. Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: a review. **Minerals**, Busan, v. 10, n. 8, p. 1-32, 26 jul. 2020.

DAVIDSON-ARNOTT, R. **Introduction to Coastal Processes and Geomorphology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

PINET, P. R., **Invitation to Oceanography**. 6 ed, Jones & Barlett Learning, 2013

PLANT, N.; VAN DONGEREN, A.; COHEN, A.; ROELVINK, D.; HALLER, M. C.; CATALÁN, Patricio. Beach Wizard: nearshore bathymetry estimation through assimilation of model computations and remote observations. **Coastal Engineering**, [S.L.], v. 55, n. 12, p. 1016-1027, dez. 2008.

PRODANOV, B.; KOTSEV, I.; LAMBEV, T.; BEKOVA, R. Unmanned Aerial Vehicles for Surveying the Bulgarian Black Sea Coast. **Comptes Rendus de L'Academie Bulgare Des Sciences**, Varna, p. 666-671, 28 maio 2020.

RESCK, R. P.; B. NETO, J. F.; COELHO, R.M. P. Nova batimetria e avaliação de parâmetros morfométricos da Lagoa da Pampulha (Belo Horizonte, Brasil). **Revista Geografias**, Belo Horizonte, p. 24-37, dez. 2007.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 135-151, ago. 2004.

RUESSINK, B. G.; MILES, J. R.; FEDDERSEN, F.; GUZA, R. T.; ELGAR, S. Modelling the alongshore current on barred beaches. **Journal Of Geophysical Research: Oceans**, [S.L.], v. 106, n. 10, p. 22451-22463, 15 out. 2001.

SANTOS, C. R. **Inter-relação entre a dinâmica da vegetação pioneira e os padrões morfo-sedimentológicos sazonais da Praia da Joaquina**. 1995. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

SCHIMIDT, W. E.; WOODWARD, B.,T; MILLIKAN, K. S.; GUZA, R. T; RAUBENHEIMER, B.; ELGAR,S. A GPS-Tracked Surf Zone Drifter. **Journal of atmospheric and oceanic technology**, v.20, p. 1069-1075, jul. 2003.

SHORT, A.D.; Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. Coastal Studies Unit, School of Geosciences University of Sidney, Australia, 1999.

SILVA, G. M.; **Orientação da Linha de Costa e Dinâmica dos Sistemas Praia e Duna: Praia de Moçambique, Florianópolis, SC** 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SMIT, P.; JANSSEN, T.; HOLTHUIJSEN, L.; SMITH, J. Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics. **Coastal Engineering**, v. 83, p. 36–48, out. 2013

SPYDELL, M.S., FEDDERSEN, F. A Lagrangian Stochastic Model of Surf Zone Drifter Dispersion. **Journal of Geophysics Research**, v. 117, p. 1-14,2012

STACEY, M. W.; POND, S.; NOWAK, Z. P. A Numerical Model of the Circulation in Knight Inlet, British Columbia, Canada. **Journal of Physical Oceanography**, British Columbia, v. 25, n. 6, p. 1037-1062, jun. 1995.

STORLAZZI, C. D.; ANNOUK, E. R.; VAN DONGEREN, A R. A Numerical Study of Geomorphic and Oceanographic Controls on Wave-Driven Runup on Fringing Reefs with Shore-Normal Channels. **Marine Science Engineering** v.10, p 828, 2022

TANAJURA,E. L. X.; KRUEGER, C. P.; GONÇALVES, R. M. Análise Da Acurácia Dos Métodos Cinemáticos De Posicionamento Gps Em Aplicações Costeiras. **Bol. Ciências Geodesia** , Curitiba, v. 17, n. 1, p.23-36, jan-mar 2011.

THIELICKE, W.; STAMHUIS, E. J.; PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. **Journal of open research software**. Alemanha, v.2, p.1-10, 2014.

TOLDO, E. E., DILLENBURG S. R., ALMEIDA, L. E. S. B., TABAJARA, L. L., MARTINS, R. R. e CUNHA, L. O. B. P., Parâmetros morfodinâmicos da Praia de Imbé, RS. **Pesquisas** v. 20 n.01, 1993.

TORRONTÉGUY, M. C. **Sistema Joaquina - Morro Das Pedras E Praias Adjacentes Da Costa Leste Da Ilha De Santa Catarina: Aspectos Morfodinâmicos, Sedimentológicos E Fatores Condicionantes**. 2002. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TURNER, I. L.; HARLEY, M. D.; DRUMMOND, C. D. UAVs for coastal surveying. **Coastal Engineering**, Sydney, v. 114, p. 19-24, ago. 2016.

VOS, K. **Remote sensing of the nearshore zone using a rotary-wing UAV**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia, Water Research Laboratory, Universidade de Nova Gales do Sul, Sydney, 2017.

ZHANG, Z. Flexible Camera Calibration by Viewing a plane from Unknown Orientations. **Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision**, Washington, 1999.

ZHANG, R.; ZIJLEMA, M.; STIVE, M. J. F. Laboratory validation of SWASH longshore current modelling. **Coastal Engineering**, Holanda, set. 2018

ZIJLEMA, M.; STELLING, G.; SMIT, P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. **Coastal Engineering**, Holanda, v. 58, n.10, p.992-1012, maio 2011

APENDICE A

```

% Intrinsic and Extrinsic Camera Parameters
%
% This script file can be directly executed under Matlab to recover the
camera intrinsic and extrinsic parameters.
% IMPORTANT: This file contains neither the structure of the calibration
objects nor the image coordinates of the calibration points.
%           All those complementary variables are saved in the complete
matlab data file Calib_Results.mat.
% For more information regarding the calibration model visit
http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\_doc/

%-- Focal length:
fc = [ 3037.770556874378599 ; 3052.835729495015130 ];

%-- Principal point:
cc = [ 1962.047090085627133 ; 941.630981773344956 ];

%-- Skew coefficient:
alpha_c = 0.0000000000000000;

%-- Distortion coefficients:
kc = [ 0.003742138952398 ; -0.538108121937005 ; -0.022897313222643 ;
0.028151951875301 ; 0.0000000000000000 ];

%-- Focal length uncertainty:
fc_error = [ 24.473525895141560 ; 22.794119657674031 ];

%-- Principal point uncertainty:
cc_error = [ 39.312157641826616 ; 32.100273313105994 ];

%-- Skew coefficient uncertainty:
alpha_c_error = 0.0000000000000000;

%-- Distortion coefficients uncertainty:
kc_error = [ 0.065390918722612 ; 0.232017678899535 ; 0.003246059485057 ;
0.007527688539945 ; 0.0000000000000000 ];

%-- Image size:
nx = 3840;
ny = 2160;

%-- Various other variables (may be ignored if you do not use the Matlab
Calibration Toolbox):
%-- Those variables are used to control which intrinsic parameters should
be optimized

n_ima = 15;                                % Number of calibration images
est_fc = [ 1 ; 1 ];                         % Estimation indicator of the two focal
variables

```

```

est_aspect_ratio = 1;           % Estimation indicator of the aspect
ratio fc(2)/fc(1)
center_optim = 1;              % Estimation indicator of the principal
point
est_alpha = 0;                 % Estimation indicator of the skew
coefficient
est_dist = [ 1 ; 1 ; 1 ; 1 ; 0 ]; % Estimation indicator of the
distortion coefficients

%-- Extrinsic parameters:
%-- The rotation (omc_kk) and the translation (Tc_kk) vectors for every
calibration image and their uncertainties

%-- Image #1:
omc_1 = [ -2.065350e+00 ; -1.993095e+00 ; -1.829923e-01 ];
Tc_1 = [ -1.359692e+02 ; -8.537616e+02 ; 8.361526e+03 ];
omc_error_1 = [ 9.120805e-03 ; 1.169928e-02 ; 2.202468e-02 ];
Tc_error_1 = [ 1.083767e+02 ; 8.778127e+01 ; 6.419242e+01 ];

%-- Image #2:
omc_2 = [ -1.647760e+00 ; -1.748560e+00 ; 6.107277e-01 ];
Tc_2 = [ 6.323744e+02 ; -9.581758e+02 ; 8.916951e+03 ];
omc_error_2 = [ 9.356875e-03 ; 1.015752e-02 ; 1.526299e-02 ];
Tc_error_2 = [ 1.148280e+02 ; 9.304473e+01 ; 6.011755e+01 ];

%-- Image #3:
omc_3 = [ 2.023371e+00 ; 1.869721e+00 ; 7.869004e-01 ];
Tc_3 = [ 4.331970e+01 ; -6.343698e+02 ; 7.379706e+03 ];
omc_error_3 = [ 1.116375e-02 ; 7.453326e-03 ; 1.767130e-02 ];
Tc_error_3 = [ 9.564498e+01 ; 7.749452e+01 ; 6.316680e+01 ];

%-- Image #4:
omc_4 = [ -1.684707e+00 ; -1.531883e+00 ; -7.275023e-01 ];
Tc_4 = [ -1.968654e+02 ; -4.541189e+02 ; 7.665983e+03 ];
omc_error_4 = [ 7.771636e-03 ; 1.074625e-02 ; 1.561767e-02 ];
Tc_error_4 = [ 9.917124e+01 ; 8.036310e+01 ; 5.913812e+01 ];

%-- Image #5:
omc_5 = [ 1.899963e+00 ; 1.974632e+00 ; -6.520329e-01 ];
Tc_5 = [ -4.409331e+01 ; -6.065435e+02 ; 9.172045e+03 ];
omc_error_5 = [ 7.454202e-03 ; 9.286692e-03 ; 1.849388e-02 ];
Tc_error_5 = [ 1.183134e+02 ; 9.600636e+01 ; 6.137365e+01 ];

%-- Image #6:
omc_6 = [ -1.515358e+00 ; -2.538785e+00 ; 9.952399e-01 ];
Tc_6 = [ 1.297272e+03 ; -9.279756e+02 ; 9.593286e+03 ];
omc_error_6 = [ 1.057454e-02 ; 8.600093e-03 ; 1.892636e-02 ];
Tc_error_6 = [ 1.238521e+02 ; 1.007678e+02 ; 6.362111e+01 ];

%-- Image #7:
omc_7 = [ 2.350505e+00 ; 1.419217e+00 ; -2.577914e-01 ];
Tc_7 = [ -4.462515e+02 ; -1.750064e+02 ; 8.689612e+03 ];
omc_error_7 = [ 9.232166e-03 ; 6.591695e-03 ; 1.912434e-02 ];
Tc_error_7 = [ 1.124914e+02 ; 9.084427e+01 ; 6.355605e+01 ];

```

```

%-- Image #8:
omc_8 = [ -1.875545e+00 ; -1.165413e+00 ; -3.070997e-01 ];
Tc_8 = [ 1.845018e+02 ; -3.013994e+02 ; 8.767647e+03 ];
omc_error_8 = [ 8.628064e-03 ; 9.651351e-03 ; 1.529475e-02 ];
Tc_error_8 = [ 1.133505e+02 ; 9.125070e+01 ; 6.194073e+01 ];

%-- Image #9:
omc_9 = [ -1.336978e+00 ; -2.218957e+00 ; -1.035894e+00 ];
Tc_9 = [ 9.741035e+02 ; -8.828954e+02 ; 7.781381e+03 ];
omc_error_9 = [ 5.224212e-03 ; 1.248368e-02 ; 1.716987e-02 ];
Tc_error_9 = [ 1.008200e+02 ; 8.209613e+01 ; 6.568249e+01 ];

%-- Image #10:
omc_10 = [ -1.373207e+00 ; -1.429147e+00 ; 8.342412e-01 ];
Tc_10 = [ 1.303017e+03 ; -1.127344e+03 ; 9.408843e+03 ];
omc_error_10 = [ 9.555080e-03 ; 1.051846e-02 ; 1.271483e-02 ];
Tc_error_10 = [ 1.215416e+02 ; 9.845120e+01 ; 6.366191e+01 ];

%-- Image #11:
omc_11 = [ 1.854154e+00 ; 1.668629e+00 ; 9.779429e-01 ];
Tc_11 = [ 3.249837e+02 ; -1.028844e+03 ; 7.137887e+03 ];
omc_error_11 = [ 1.127863e-02 ; 8.767560e-03 ; 1.537294e-02 ];
Tc_error_11 = [ 9.261762e+01 ; 7.491189e+01 ; 6.241160e+01 ];

%-- Image #12:
omc_12 = [ -2.105362e+00 ; -2.097915e+00 ; -1.323669e-01 ];
Tc_12 = [ 2.259834e+02 ; -1.264539e+03 ; 8.695427e+03 ];
omc_error_12 = [ 1.019745e-02 ; 1.248740e-02 ; 2.425949e-02 ];
Tc_error_12 = [ 1.130317e+02 ; 9.146796e+01 ; 6.937265e+01 ];

%-- Image #13:
omc_13 = [ -1.629664e+00 ; -1.046198e+00 ; -1.609681e-01 ];
Tc_13 = [ 6.976516e+01 ; -8.396475e+02 ; 8.869491e+03 ];
omc_error_13 = [ 9.050322e-03 ; 9.944434e-03 ; 1.329622e-02 ];
Tc_error_13 = [ 1.145503e+02 ; 9.234139e+01 ; 6.090831e+01 ];

%-- Image #14:
omc_14 = [ 1.509740e+00 ; 2.368165e+00 ; -9.509715e-01 ];
Tc_14 = [ 1.170237e+03 ; -1.107333e+03 ; 9.580276e+03 ];
omc_error_14 = [ 6.746391e-03 ; 1.082500e-02 ; 1.853787e-02 ];
Tc_error_14 = [ 1.236316e+02 ; 1.005084e+02 ; 6.339039e+01 ];

%-- Image #15:
omc_15 = [ -2.034229e+00 ; -2.023223e+00 ; -6.380533e-02 ];
Tc_15 = [ -1.520512e+02 ; -8.479935e+02 ; 8.411966e+03 ];
omc_error_15 = [ 9.986635e-03 ; 1.249628e-02 ; 2.281741e-02 ];
Tc_error_15 = [ 1.089405e+02 ; 8.812140e+01 ; 6.348419e+01 ];

```