

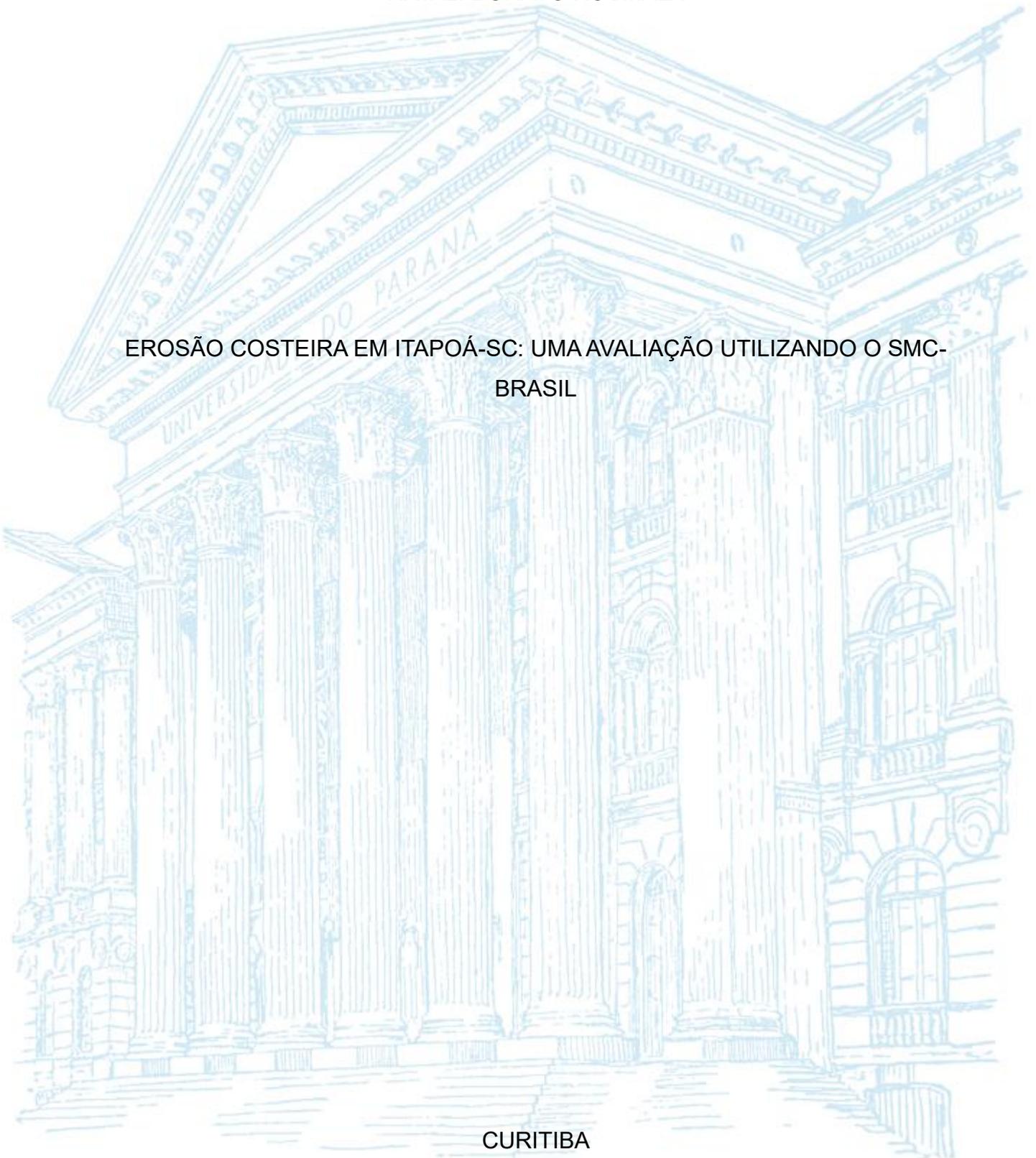
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATALI BONATO KOSMALA

EROSÃO COSTEIRA EM ITAPOÁ-SC: UMA AVALIAÇÃO UTILIZANDO O SMC-  
BRASIL

CURITIBA

2022



NATALI BONATO KOSMALA

EROSÃO COSTEIRA EM ITAPOÁ-SC: UMA AVALIAÇÃO UTILIZANDO O SMC-  
BRASIL

TCC apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra.Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha.

CURITIBA

2022



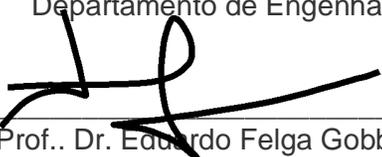
## TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

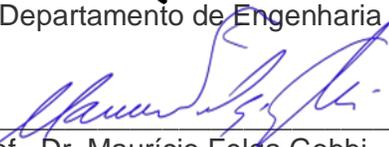
NATALI BONATO KOSMALA

### EROSÃO COSTEIRA EM ITAPOÁ-SC: UMA AVALIAÇÃO UTILIZANDO O SMC-BRASIL

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 9.5, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora:   
Profª. Dra. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha  
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Membro(a) 1:   
Prof.. Dr. Eduardo Felga Gobbi  
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Membro(a) 2:   
Prof.. Dr. Maurício Felga Gobbi  
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

*Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota. (MADRE TERESA DE CALCUTÁ)*

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a erosão costeira no município de Itapoá, localizado do Estado de Santa Catarina, através do Sistema de Modelagem Costeira (SMC), e analisar a variação da linha de costa para uma determinada região do litoral de Itapoá através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O SMC é uma ferramenta computacional que possibilita o estudo dos processos costeiros, possui uma base de dados de onda com série temporal de 60 anos. Quatro perfis perpendiculares à costa foram criados a fim de estudar e calcular o transporte de sedimentos e a cota de inundação. Com a modelagem das ondas e das correntes costeiras para a praia da Cidade de Itapoá através do SMC, duas direções de ondas são predominantes na área de estudo: leste-sudeste (ESE) e sudeste (SE), sendo que juntas representam 76% das ondas incidentes na região. O transporte dos sedimentos é predominante para norte e ao longo de grande parte do arco praias desenvolve-se regiões de recirculação devido à presença de bancos de areia. O estudo mostrou ainda que a região de interesse do estudo possui grande vulnerabilidade a erosão costeira.

Palavras-chave: Erosão Costeira. Ondas. SMC-Brasil. Itapoá. Sedimentos.

## **ABSTRACT**

The present work aims to evaluate coastal erosion in the municipality of Itapoá, located in the State of Santa Catarina, through the Coastal Modeling System (SMC), and to analyze the variation of the coastline for a certain region of the coast of Itapoá through a Geographic Information System (QGIS). The SMC is a computational tool that enables the study of coastal processes. It has a wave database with a time series of 60 years. Four profiles perpendicular to the coast were created in order to study and calculate the sediment transport and the flood level. With the modeling of waves and coastal currents for the beach of Cidade de Itapoá through the SMC, two wave directions are predominant in the study area: east-southeast (ESE) and southeast (SE), which together represent 76% of the waves incident in the region. The transport of sediments is predominant to the north and along a large part of the beach arc recirculation regions develop due to the presence of sandbanks. The study showed that the region of interest of the study has great vulnerability to coastal erosion.

**Keywords:** Coastal Erosion. Waves. SMC-Brasil. Itapoá. Sediments.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA GERAL DO PERFIL DE PRAIA. ....	12
FIGURA 2 - PARÂMETROS DE UMA ONDA OCEÂNICA IDEALIZADA COM PERFIL VERTICAL COM DIMENSÕES LINEARES E FORMATAÇÃO SENOIDAL .....	14
FIGURA 3 - DIFERENTES TIPOS DE ONDAS OCEÂNICAS. ....	16
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DOS MÓDULOS E SUBMÓDULOS QUE CONSTITUEM O SMC-BRASIL. ....	19
FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE ITAPOÁ – SC.....	21
FIGURA 6 - COMPLEXOS ESTUARINOS NA COSTA DO PARANÁ E LITORAL NORTE DE SANTA CATARINA.....	22
FIGURA 7 - ROSA DOS VENTOS PARA O PERÍODO DE VERÃO DE 2019 E INVERNO DE 2019 NA ESTAÇÃO DE ITAPOÁ- SC.....	23
FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE HABITANTES DA CIDADE DE ITAPOÁ - SC NOS ÚLTIMOS 30 ANOS. ....	24
FIGURA 9 - CARTA NÁUTICA Nº 1804 DA BAÍA DE SÃO FRANCISCO DO SUL. ...	25
FIGURA 10 - TIPOS DE PRAIAS DO LITORAL DE ITAPOÁ: (1) PRAIAS ESTUARINAS; (2) PRAIAS OCEÂNICAS OU DE MAR ABERTO; (3) PRAIAS DE DESEMBOCADURA. A REGIÃO (4) REPRESENTA O LOBO FRONTAL DO DELTA DE MARÉ VAZANTE E A REGIÃO (5) A BARRA MARGINAL DO CANAL PRINCIPAL DE VAZANTE DO DELTA.....	26
FIGURA 11 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	27
FIGURA 12 – REGIÃO DO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL. ....	28
FIGURA 13 - REGISTROS FOTOGRÁFICOS REALIZADOS NA REGIÃO ENTRE AGOSTO DE 1996 E SETEMBRO DE 1997, MOSTRANDO RECUO NA LINHA DE COSTA -.....	29
FIGURA 14 - METODOLOGIA PARA PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO SMC-BRASIL .....	31
FIGURA 15 – EXPLORADOR DE DADOS DO SMC-TOOLS E PONTO W.....	33
FIGURA 16 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA PARA O PONTO W:(A) A FREQUÊNCIA (B) O HISTOGRAMA DE HS; (C) A DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA HS E TP; (D) A ROSA DE DIREÇÃO DE ONDAS, (E) A DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA HS E A DIREÇÃO MÉDIA DE ONDA; (F) OS PRINCIPAIS PARÂMETROS DAS ONDAS EM CADA DIREÇÃO.....	34
FIGURA 17 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE PERÍODO DE PICO DA ONDA: A) RELAÇÃO PERÍODO DE RETORNO E PERÍODO DE ONDA; (B) FREQUÊNCIA ACUMULADA DO PERÍODO DE PICO DA ONDA; (C) DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA DO PERÍODO DE PICO E A DIREÇÃO MÉDIA DA ONDA; (D) O HISTOGRAMA DO PERÍODO DE PICO; (E) PERÍODO DE PICO VS. DIREÇÃO.....	35
FIGURA 18 - MALHA DEFINIDA PARA A PROPAGAÇÃO DE ONDAS A PARTIR DO PONTO W, COM DIREÇÃO LESTE-SUDESTE (ESE). ....	37
FIGURA 19 - MALHA DEFINIDA PARA A PROPAGAÇÃO DE ONDAS A PARTIR DO PONTO W, COM DIREÇÃO SUDESTE (SE). ....	38
FIGURA 20 – SAÍDA DO SMC, COM A DEFINIÇÃO DAS MALHAS E DO PONTO W. ....	39
FIGURA 21 – SAÍDA DO SMC-BRASIL, COM A DEFINIÇÃO DOS CASOS A SEREM PROPAGADOS (MOPLA) E A BATIMETRIA DA REGIÃO.....	40

FIGURA 22 - ROSAS DE ONDAS DO PONTO W PARA CADA ESTAÇÃO DO ANO: VERÃO, OUTONO, INVERNO E PRIMAVERA.....	45
FIGURA 23 – ALTURA DE ONDA (m) PARA O ESTADO DE MAR MÉDIO.....	46
FIGURA 24 - ALTURA DE ONDA (m) PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.....	46
FIGURA 25 - PADRÃO DE CORRENTE (m/s) PARA O ESTADO DE MAR MÉDIO.....	48
FIGURA 26 - ZOOM DA ÁREA DE ESTUDO PARA O ESTADO DE MAR MÉDIO... ..	48
FIGURA 27 - PADRÃO DE CORRENTE (m/s) PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.....	49
FIGURA 28 - ZOOM DA ÁREA DE ESTUDO PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.....	49
FIGURA 29 – PADRÃO DE CIRCULAÇÃO GERADO PELAS ONDAS (m <sup>3</sup> /s) PARA O CLIMA DE ONDA MÉDIA.....	50
FIGURA 30 PADRÃO DE CIRCULAÇÃO GERADO PELAS ONDAS (m <sup>3</sup> /s) PARA O CLIMA DE ONDA DE TEMPESTADE.....	51
FIGURA 31 - - ZOOM DA ÁREA DE ESTUDO PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.....	51
FIGURA 32 - DIAGRAMA DO TRANSPORTE MÉDIO DE SEDIMENTOS. ....	53
FIGURA 33 - LINHA VETORIZADA DA INTERFACE VEGETAÇÃO AREIA, COM A IMAGEM DE FUNDO DO ANO DE 2021. LINHA AMARELA REPRESENTA O ANO DE 2011 E A LINHA VERDE O ANO DE 2021.....	54
FIGURA 34 - PONTOS UTILIZADOS NO ESTUDO DA VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA.....	55
FIGURA 35 - EROÇÃO PROCEDIDA DE UM ENROCAMENTO ENTRE OS PONTOS 6 E 8 DA ÁREA DE ESTUDO.....	56
FIGURA 36 - EROÇÃO CIRCUNDADA POR ENROCAMENTOS ENTRE OS PONTOS 22 E 23 DA ÁREA DE ESTUDO.....	57
FIGURA 37 - COMPARAÇÃO ENTRE AEROFOTO DATADA DE 1957 E IMAGEM DE SATÉLITE DO GOOGLE EARTH.....	58

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA TRÊS DIFERENTES CENÁRIOS: ESE MED, ENE TEMP. E SE MED.....	42
TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS NO PONTO W.....	44
TABELA 3 – VOLUME MÉDIO ANUAL DE SEDIMENTOS PARA OS DIFERENTES PERFIS.....	52
TABELA 4 – DIFERENÇA ENTRE AS LINHAS DE COTA QUE REPRESENTAM A INTERFACE VEGETAÇÃO-AREIA. ....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>3</b>	<b>revisão de literatura .....</b>	<b>11</b>
3.1	EROSÃO COSTEIRA .....	11
3.2	ONDAS .....	14
3.3	DELTAS E DERIVA LITORÂNEA .....	17
3.4	MARÉS .....	18
3.5	SMC.....	18
3.6	ÁREA DE ESTUDO.....	21
<b>4</b>	<b>metodologia .....</b>	<b>30</b>
4.1	DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO .....	32
4.2	DEFINIÇÃO DA MALHA DE ESTUDO .....	36
4.3	PROPAGAÇÃO DE ONDAS .....	39
4.4	AVALIAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS .....	40
4.5	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
5.1	ANÁLISE DO PONTO W.....	44
5.2	PROPAGAÇÃO DE ONDAS .....	45
5.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	52
5.4	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS .....	54
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A forma como o homem vem utilizando a zona costeira é incompatível com os processos naturais observados nesses ecossistemas, principalmente no que se refere à posição da linha de costa e sua variação espacial e temporal. São diversos os fatores que contribuíram para que, nos últimos anos, a erosão costeira fosse agravada em praticamente todas as regiões litorâneas do planeta. Em grande parte, o recuo da linha de costa está associado às atividades antrópicas, como implantação de complexos urbanísticos, subsidência do solo, elevação do nível médio do mar, retirada de areia, desenvolvimento econômico da região costeira, dragagens etc. (Porpilho, 2012).

Uma praia é erodida quando as perdas excedem os ganhos de sedimentos. Atualmente, praticamente todos os países possuidores de litoral são afetados por alterações espaciais da linha de costa, alguns deles alcançando estágios críticos. Esse tipo de situação pode ser prejudicial economicamente para países em desenvolvimento, pois a perda de infraestruturas, em razão da erosão costeira, pode ser de difícil reparação, devido à falta de recurso para a recuperação dos danos, como é o caso do Brasil.

No Brasil, e em particular no estado de Santa Catarina, os processos de erosão costeira apresentam-se principalmente em municípios com costa urbanizada. O estado de Santa Catarina possui 27 litorâneos, e que possuem grande importância econômica, turística, portuária e que sofrem processos de erosão (OLIVEIRA, 2009). Segundo Muehe (2006), ressacas geradas por tempestades que frequentemente estão ligadas a ciclones extratropicais no sul do Brasil são as principais responsáveis pela erosão costeira no estado de Santa Catarina.

Neste contexto enquadra-se a cidade de Itapoá, localizada no litoral norte do estado de Santa Catarina, e que possui uma linha de costa de aproximadamente 30km. O município vem enfrentando, problemas de erosão costeira ao longo dos anos (ANGULO, et al., 2002). A economia do município baseia-se principalmente na atividade portuária, construção civil, turismo, pesca artesanal, agricultura de subsistência e pecuária (Município de Itapoá, 2022). Poucos trabalhos sobre as causas e as possíveis ações para mitigar o problema são encontrados na literatura. Considerando o grande “serviço ambiental” prestado pelas praias, o presente trabalho

se propõe a avaliar a erosão costeira no município de Itapoá, através do Sistema de Modelagem Costeira (SMC), e analisar a variação da linha de costa para uma determinada região do litoral de Itapoá através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O SMC foi desenvolvido por pesquisadores do Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria (IH-Cantábria) para o Ministério do Meio Ambiente da Espanha. É uma ferramenta que permite estudar processos costeiros, quantificando possíveis variações que o litoral pode sofrer como consequência de eventos naturais ou eventos extremos, bem como alternativas de prevenção e redução do impacto da erosão costeira, com soluções de curto, médio e longo prazo para tais impactos. A adaptação do SMC para o litoral Brasileiro foi promovida pelo Governo Federal através do projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira”, em 2011.

O programa QGIS é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) gratuito, de código aberto, licenciado pela Licença Pública Geral (*GNU General Public License*). Foi concebido em 2002 pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) e por um grupo de desenvolvedores voluntários que constantemente disponibilizam atualizações e correções.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar a erosão costeira e a variação da linha de costa das praias da cidade de Itapoá, localizadas no litoral norte do estado de Santa Catarina, estimando o balanço sedimentar, utilizando como ferramentas auxiliares o Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC-Brasil) e um sistema de informações geográficas (QGIS e GOOGLE EARTH PRO).

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir os estados de mar médio e extremo do litoral norte do estado de Santa Catarina, com destaque para a região próxima ao município de Itapoá-SC, através do programa SMC;
- Avaliar o processo de erosão na região do município de Itapoá-SC, usando o programa SMC;
- Avaliar a variação da linha de costa da área de estudo através do programa SIG, ao longo do tempo.
- Comparar a evolução da linha de costa nos últimos 70 anos usando imagens de satélite processadas no QSIG.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 EROSÃO COSTEIRA

A erosão costeira ocorre quando as praias perdem mais sedimentos ao longo da costa do que recebem, ou seja, a supressão sedimentar é maior do que o suprimento, levando a um balanço sedimentar negativo. São processos que causam erosão costeira: ondas, ondas atuantes em períodos de tempestades, intemperismo, redução do aporte de sedimentos dos rios, erosão de falésias, degradação de ecossistemas costeiros e de dunas (Bird, 2008).

A erosão costeira apresenta tendências evolutivas e naturais. É um processo físico de mudança de paisagem e evolução de relevo costeiro. A supressão de areia de uma praia serve para suprir outra praia devido ao transporte de sedimentos ao longo da costa (Bulhoes, 2020).

A influência antrópica no balanço sedimentar das praias é um problema que afeta negativamente o equilíbrio e a estabilidade da costa. Exemplos de influência antrópica seriam a mineração de areias, que são utilizadas em larga escala na indústria civil, e a construção de estruturas na costa, como a urbanização das faixas de praia. As consequências da erosão costeira geralmente estão ligadas ao bem-estar do homem, como a destruição e perdas de infraestrutura pública e privada, desvalorização de imóveis à beira-mar, e ainda, influencia na redução da biodiversidade, na perda de habitat e de serviços ecossistêmicos (Bulhões, 2020).

Fontes (2014) define como praia um ambiente costeiro composto por uma acumulação de sedimentos inconsolidados de variados diâmetros, comumente formado por areia e sujeito a interações dos sistemas de ondas que incidem sobre a costa.

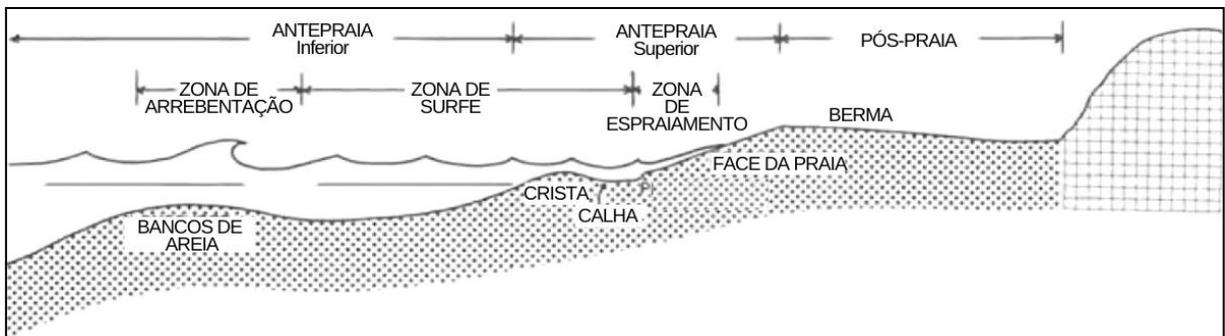
Uma praia pode ser dividida em três zonas morfodinamicamente diferentes: pós-praia, antepraia superior e antepraia inferior (Figura 1). A pós-praia estende-se desde o nível médio da maré alta até a margem terrestre da praia, podendo incluir dunas e falésias de pequeno porte. É uma região plana, denominada de berma, quase horizontal e seu limite é marcado pela mudança abrupta de inclinação (Fontes, 2014).

A antepraia superior é delimitada pela altura de maré alta e pela altura da maré baixa, onde se localiza a face da praia, uma região inclinada onde ocorre o espraiamento e é comumente reconhecida por alterações na composição e na textura

do sedimento, com a presença de fragmentos de conchas e sedimentos mais grossos. A face da praia possui uma inclinação bastante acentuada direcionada ao mar, que depende tanto da composição de sedimentos do litoral como dos processos que atuam sobre ela (Davis Jr., 1978).

A antepraia inferior representa uma ampla região entre o nível da maré baixa e os bancos de areia, podendo assumir uma ampla gama de larguras e configurações. Na maioria das vezes, a antepraia é caracterizada por bancos de areias, que são bastante contínuos e quase paralelos à praia, podendo até mesmo serem ausentes em condições de escassez de sedimentos. Os bancos de areia diferem-se entre uma praia e outra, e tais diferenças estas relacionadas à inclinação da praia (Fontes, 2014).

FIGURA 1 – DIAGRAMA GERAL DO PERFIL DE PRAIA.



FONTE: Adaptado de Davies (1978)

Praias também podem ser caracterizadas hidrodinamicamente, como pode ser observado na

FIGURA 1. A zona de arrebentação é caracterizada pela região onde as ondas incidentes tendem a instabilizar-se até o momento de quebrarem, dissipando a sua energia sobre a praia. A zona de surfe é uma função da inclinação da praia, sendo diretamente relacionada com a quebra das ondas e pela amplitude da maré. Praias com extensas zonas de surfe possuem baixa declividade, e durante o percurso, parte da energia da onda é transferida para a geração de correntes longitudinais e transversais à praia. Em contraponto, as praias inclinadas possuem zona de surfe limitada, e geralmente refletem uma parte da energia das ondas. Finalmente, a zona de espriamento é a região na qual as ondas da zona de arrebentação dissipam sua energia sobre a face praial (Fontes, 2014).

Uma praia em processo erosivo apresenta a região de pós-praia diferente da apresentada na Figura 1, pois geralmente a berma não é desenvolvida. Possuem a

zona de pós-praia e a zona de antepraia superior unidas, em declive, com perfil ascendente ligeiramente côncavo (Davis Jr., 1978).

O sedimento trazido à praia pode ser composto de qualquer material sólido que esteja disponível em quantidades significativas e que possua características apropriadas que o permitam permanecer sob as condições hidrodinâmicas da praia. Possui várias fontes, podendo ser trazido por rios, derivar de produção biológica, ser formado através de precipitados químicos, erosão de falésias e costões rochosos e subproduto de atividades vulcânicas (Fontes, 2014)

O litoral brasileiro estende-se por mais de 8000km, e conseqüentemente a zona costeira apresenta diversos climas desde o equatorial ao subtropical, assim como diferentes ambientes geológicos. Cerca de 20% da população reside em municípios costeiros, sendo as maiores densidades populacionais localizadas nos municípios do Rio de Janeiro, Salvador, Maceió, Recife, Fortaleza, Vitória e São Luiz. De uma forma genérica, pesquisas indicam que, na totalidade dos registros, a erosão no Brasil predomina sobre a progradação positiva (amplificação). Cerca de 80% da causa da erosão atribuiu-se à urbanização e à construção de estruturas rígidas (Muehe, 2005).

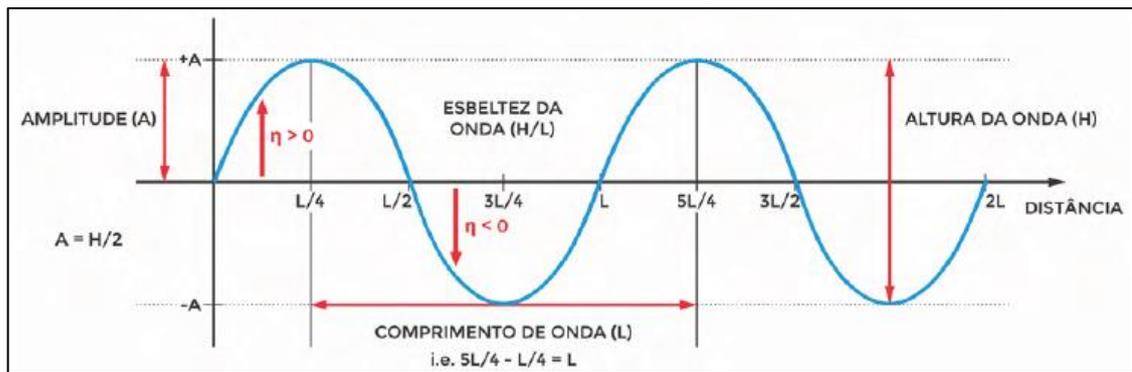
O estado com o melhor cenário em relação à erosão é o estado do Amapá, que possui 750 km de extensão costeira, e é considerado o estado mais preservado e o menos densamente povoado do país. A zona costeira do estado é recoberta por sedimentos predominantemente lamosos e é subdividida em dois setores: o setor costeiro amazônico, onde a erosão atinge 55% do território; e o setor costeiro oceânico, onde a erosão atinge 35% do território. (MMA, 2018)

De acordo com o Panorama da Erosão Costeira no Brasil (MMA, 2018), 68% da população catarinense habita a região litorânea, e o processo de erosão da costa do estado intensifica-se pelo crescente processo de urbanização. Os focos erosivos registrados no litoral de Santa Catarina possuem origem natural, sendo intensificados pela influência antrópica. Nos aproximadamente 460 km de linha de costa ao longo dos 27 municípios costeiros, 14 deles mostram casos de erosão, sendo que 51,8% dos municípios do litoral foram atingidos por problemas erosivos em algum momento, necessitando de intervenção na linha de costa.

### 3.2 ONDAS<sup>1</sup>

Ondas podem ser descritas como um fenômeno físico de propagação de energia, que atuam de um ponto a outro no tempo e no espaço. Podem ser classificadas como mecânicas, que se propagam através de um meio material, e eletromagnéticas que se propagam no vácuo. Os parâmetros das ondas no mar, levando em consideração um distúrbio simples, são apresentados na FIGURA 2.

FIGURA 2 - PARÂMETROS DE UMA ONDA OCEÂNICA IDEALIZADA COM PERFIL VERTICAL COM DIMENSÕES LINEARES E FORMATAÇÃO SENOIDAL



FONTE: Harari (2021)

Na FIGURA 2, a elevação  $\eta$  é a distância instantânea vertical de um ponto da superfície a um nível; altura de onda  $H$  é distância vertical entre uma crista e um cavado próximo; amplitude  $A$  é a altura de onda dividida por dois,  $A = H/2$ ; comprimento de onda  $L$  é a distância horizontal entre cristas ou cavados consecutivos, na direção de propagação da onda; período da onda  $T$  é o intervalo de tempo necessário para a onda produzir uma oscilação completa, e o inverso do período é a frequência  $f$ ,  $f = 1/T$ ; velocidade de fase  $c$  é a velocidade de propagação da onda definida como  $c = L/T$ ; e a esbeltez da onda é a relação  $H/L$ .

Além das forças que geram as ondas no oceano, existem forças que controlam as características das ondas, chamadas de forças restauradoras: tensão da superfície da água, gravidade e força de Coriolis. Classifica-se os tipos de ondas no oceano em:

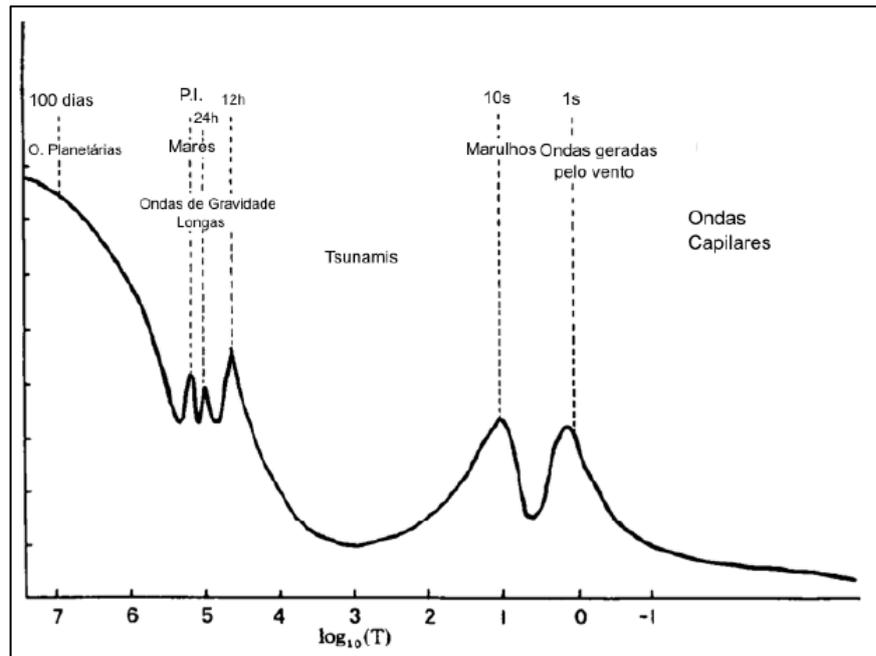
<sup>1</sup> Esta seção é adaptada e reproduz textos contidos em Sato O. (2010) IOF1224 – Ondas e Marés, Instituto Oceanográfico, USP, São Paulo. Harari J. (2021) Noções de Oceanografia [livro eletrônico], Instituto Oceanográfico, USP, São Paulo.

- a) sonoras: pequenas compressões na água possibilitam a propagação de ondas sonoras;
- b) capilares: a tensão superficial atua como força restauradora na superfície entre água e ar, originando ondas de curto comprimento e de alta frequência;
- c) gravidade: a ação restauradora da gravidade gera ondas, na qual as partículas de água que estão em deslocamento voltam à sua posição de equilíbrio;
- d) inercial: a força de Coriolis induzida pela rotação da terra. Esta tem sentido perpendicular ao vetor velocidade, dando origem a ondas inerciais;
- e) planetárias: mudanças na profundidade ou latitude geram variações na vorticidade potencial de equilíbrio, gerando lentas oscilações de larga escala conhecidas como ondas planetárias.

Estes cinco tipos principais de ondas, que somadas aos efeitos das forças restauradas, geram outros variados tipos de oscilações, sendo os mais conhecidas e estudadas as ondas de gravidade curtas geradas pelo vento. A FIGURA 3 mostra os diferentes tipos de ondas oceânicas em relação ao período.

Ondas de superfície propagam-se como oscilações na superfície do oceano, ocupando uma ampla faixa de frequências e comprimentos. Conforme mostra a FIGURA 3, as ondas de períodos muito curtos denominam-se de capilares pelo efeito da tensão superficial. As chamadas ondas de gravidade são as geradas pelo vento local, com períodos a partir de 1s, e as ondas do tipo *Swell*, que possuem períodos a partir de 10s e são geralmente originadas por ventos fortes e longínquos e irradiam da área geradora até a costa. As longas ondas de gravidade (tsunamis) são resposta das forçantes meteorológicas ou provocadas por terremotos; as marés são ondas forçadas pela gravidade da Lua e do Sol. As ondas planetárias possuem períodos muito longos, são devidas à variação do efeito de rotação da Terra nas correntes marítimas, um exemplo são as ondas de *Rossby* que se deslocam para Oeste ao longo dos paralelos terrestres.

FIGURA 3 - DIFERENTES TIPOS DE ONDAS OCEÂNICAS.



FONTE: Sato (2010)

Na costa brasileira, o clima de ondas é determinado pela ação de ventos originados no Atlântico Sul. Estes ventos são controlados por três sistemas atmosféricos: Zona de Convergência Intertropical, Anticiclone Tropical do Atlântico Sul e Anticiclones Polares Migratórios (APMs). Os APMs caracterizam-se pelo seu deslocamento de massas de ar com temperatura mais baixa de sudeste para nordeste ao longo da costa sudeste da América do Sul, sendo sempre precedidos de sistemas frontais (SFs). Os SFs são perturbações atmosféricas que apresentam maior significância no clima das regiões Sul e Sudeste do Brasil, deslocando-se numa velocidade média de 500 km/dia, gerando assim ondas dos quadrantes Sudoeste, Sul e Sudeste, que atingem a costa do litoral sul do Brasil. Sendo assim estas ondas incidentes possuem em média períodos de 10 a 16 segundos e altura de 1,0 a 4,0 metros (Tessler, et al., 2005).

O estado do mar descreve a condição geral da superfície marinha num dado instante de tempo, e é sensível a alterações das variáveis meteorológicas. É descrito por parâmetros como altura, período, direção e frequência de propagação de ondas. Pode ser classificado como “médio” levando em consideração os parâmetros médios ocorridos durante o ano, ou como “extremo”, levando em consideração alterações meteorológicas extremas como tempestades e furacões que levam a alterações significativas nos parâmetros (<https://www.aprh.pt/rgci/glossario/estadomar.html>).

### 3.3 DELTAS E DERIVA LITORÂNEA

Os deltas são definidos como regiões onde ocorrem acumulações de sedimentos, tanto subaquáticas quanto subaéreas. Nas regiões costeiras, estes sedimentos são derivados de interações das correntes fluviais, correntes marinhas, ou marés. Todos os deltas em formação ativa possuem um atributo em comum: o rio fornece sedimentos mais rapidamente à costa do que podem ser removidos por processos marinhos (Davis Jr., 1978).

Parte dos sedimentos que chegam à costa originam-se dos rios e são distribuídos pela ação de ondas e correntes, parte origina-se da erosão de falésias, planícies costeiras e deltas, e outra parte da deriva do fundo do mar. O tipo do sedimento é dependente de formações rochosas que afloram dentro de uma bacia hidrográfica (Bird, 2008).

Na zona de arrebentação, região onde ocorre a quebra de ondas, grandes quantidades de sedimentos entram em suspensão, tornando-se susceptíveis ao transporte por correntes. As principais correntes que ocorrem nesta zona de arrebentação são as geradas pela quebra das ondas. Podem ocorrer no sentido transversal, chamadas de correntes de retorno ou de correntes de ressaca, ou no sentido longitudinal, chamado corrente de deriva (MMA, 2018).

A deriva litorânea consiste no transporte de sedimentos ao longo da costa. Resulta de duas componentes vetoriais, a deriva costeira, que atua no sentido paralelo à linha de costa e na zona de *surfe*, e a deriva praial, que atua na face da praia, com um padrão de transporte em *zig-zag*. Quando ondas se aproximam da linha de costa a partir de um ângulo oblíquo, correntes paralelas à costa se desenvolvem na região entre a praia e a zona de arrebentação (Carassai, 2013).

O mecanismo de processos erosivos, o transporte e a deposição de sedimentos são controlados por fatores hidrodinâmicos. A movimentação da água é dependente do regime de ondas associados a correntes litorâneas (correntes de deriva litorânea e correntes de retorno). Marés de sizígia combinadas com ondas de tempestades e maré meteorológica são responsáveis por processos erosivos severos em praias e dunas, pois são eventos de alta energia (Freitas, 2019).

### 3.4 MARÉS

As marés são oscilações verticais da superfície marítima, ou de outra grande massa d'água sobre a terra, geradas pela atração gravitacional entre a Terra e a Lua e, em menor extensão, pela atração gravitacional entre a Terra e o Sol. A água do mar se movimenta no sentido horizontal, gerando correntes de maré, e no sentido vertical, gerando as marés propriamente ditas (Sato, 2010).

Quando a superfície da água atinge a máxima elevação ocorre uma preamar e quando atinge a mínima elevação ocorre uma baixamar. A amplitude da maré dependerá da fase da lua. Quando a lua é dita cheia ou nova, a atração gravitacional da Lua se combina com a atração gravitacional do Sol criando maiores amplitudes de maré alta e menores amplitudes de maré baixa, este tipo de maré é chamada de maré de sizígia. Quando a Lua se encontra no quarto crescente ou minguante, as forças de atração gravitacional da Lua e do Sol se opõem, sendo assim as marés se mostram com valores médios, este tipo de maré é chamado de maré de quadratura (Harari, 2021).

### 3.5 SMC

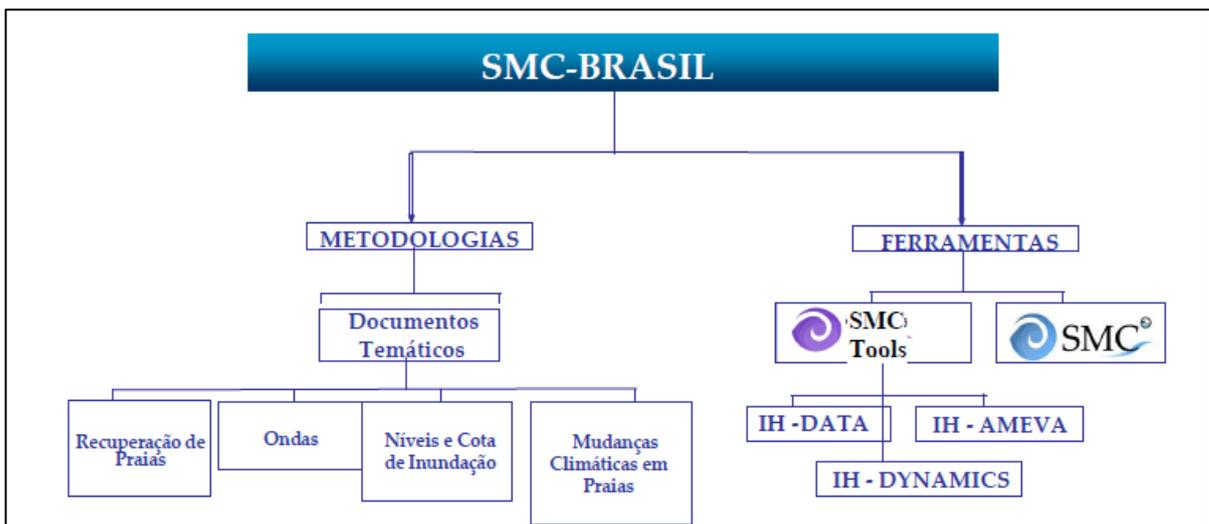
O Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) é uma ferramenta computacional inicialmente desenvolvida pelo Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHCantabria) da Universidade de Cantabria – Espanha, que através do projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira” do MMA foi adaptado ao litoral brasileiro.

O SMC-Brasil foi estruturado com escalas temporais e espaciais dinâmicas, que influenciam na morfologia da costa, propiciando a elaboração de estudos, baseando-se nas metodologias descritas nos documentos temáticos existentes sobre o sistema. A FIGURA 4 mostra o fluxograma dos módulos e submódulos que constituem o SMC-Brasil; o sistema é composto por dois módulos: SMC-Tools e SMC 3.0.

O SMC-Tools é dividido em dois submódulos de pré-processamento: IH-DATA e IH-AMEVA e um de pós processo, o IH-DYNAMICS. O pré-processamento permite ao usuário acessar as bases de dados do submódulo IH-DATA, que possui dados de

batimetria, reanálise de dados de ondas, identificado como pontos DOW (*Downscaling Ocean Waves*) e dados de marés meteorológicas, identificados como pontos GOT (*Global Ocean Tides*) e GOS (*Global Ocean Surge*); o submódulo IH-AMEVA realiza análises estatísticas dos dados obtidos. O pré-processamento tem como objetivo principal a obtenção de condições de contorno para a realização das modelagens numéricas desenvolvidas no SMC 3.0. O submódulo IH-DYNAMICS avalia as ondas em localidades próximas à costa, partindo de um ponto em águas profundas, e realiza a análise estatística e espectral das ondas próximas à costa, sendo possível traçar perfis de praia perpendiculares à linha de costa, em que é possível calcular o transporte de sedimentos, fluxo médio de energia, posição da cota de inundação e ponto onde ocorre a arrebentação da onda.

FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DOS MÓDULOS E SUBMÓDULOS QUE CONSTITUEM O SMC-BRASIL.



FONTE: - Manual SMC-Brasil.

O SMC 3.0 divide-se em dois submódulos: análise em curto prazo de praias e análise em longo prazo de praias. O primeiro permite analisar sistemas costeiros numa escala temporal e espacial de curto prazo, e é estruturado pelos programas PETRA e MOPLA.

O PETRA modela a evolução morfológica do perfil transversal de praias simulando a propagação de ondas monocromáticas e espectrais. Permite criar um projeto a partir da batimetria, sedimento e perfil temporal associados a uma área de estudo na costa, gerenciando as informações de forma hierarquizada em diretórios. O

programa produz resultados que podem ser visualizados em tempo real, gerando uma animação com a evolução morfológica da praia, e *a posteriori*, gerando gráficos.

O MOPLA simula a evolução morfodinâmica das praias, numa escala a curto prazo. Possui seis modelos numéricos, os que simulam os efeitos de um trem de ondas e os que simulam a propagação de um espectro de energia (OLUCA, COPLA E EROS). Quando as ondas se aproximam da costa, elas são submetidas a fenômenos modificadores, como os processos de refração, reflexão, difração e empinamento, o que distribui espacialmente sua energia. A fim de caracterizar essa dinâmica, se faz necessário propagar dados de ondas existentes em águas profundas até a área de estudo. A partir da base de dados DOW, o SMC-Brasil realiza a propagação até a costa utilizando o modelo chamado de OLUCA. O OLUCA é um modelo de propagação de ondas fracamente não-linear, que considera refração e difração, que inclui os fenômenos modificadores de ondas, simulando-as sobre batimetrias irregulares, com base na equação da declividade suave desenvolvida por Radder (1979), adaptada por Booij (1981). Também realiza a propagação de componentes de energia com a inclusão de refração-difração (REF/DIF) com interação onda-corrente com aproximação parabólica.

O COPLA, conhecido como modelo de correntes, é um modelo numérico que resolve equações de fluxo (interação onda-corrente) dentro da zona de surfe, com parâmetros de entrada obtidos através dos resultados do modelo OLUCA. Resolve as equações bidimensionais, em planta, de conservação de massa e de quantidade de movimento.

O EROS é um modelo numérico que resolve equações do fluxo de sedimentos dentro da zona de surfe, ocasionado pela quebra de ondas e alterações na batimetria potencialmente causadas pelo transporte de sedimentos. O modelo utiliza os dados de saída de ondulações do modelo OLUCA e os dados de corrente geradas por quebra de ondas do modelo COPLA como dados de entrada, e as características sedimentares da praia.

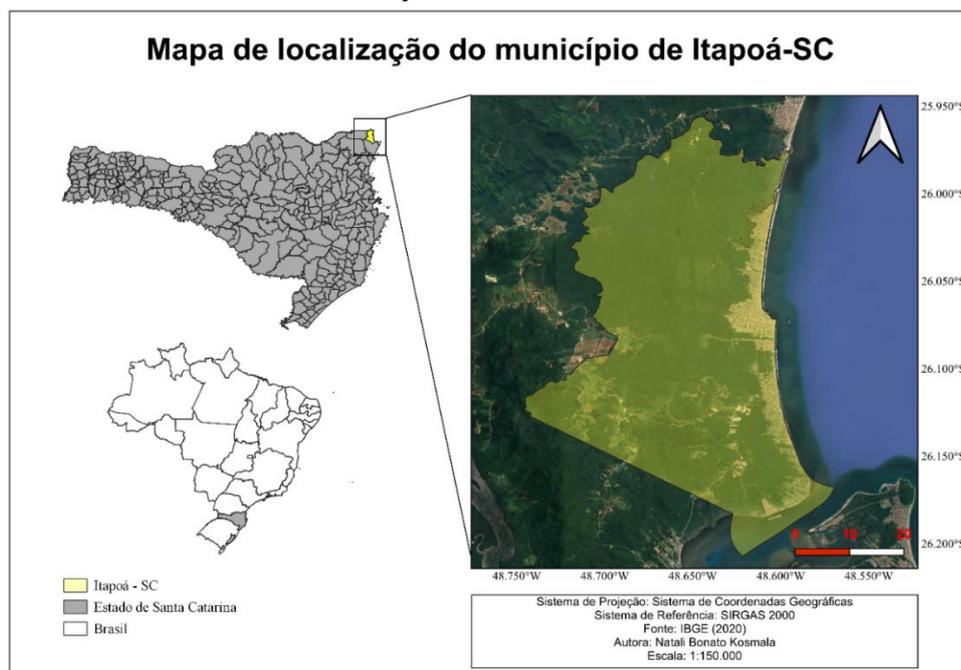
O SMC também realiza uma análise em escala temporal longa, com o objetivo de determinar a forma final de uma praia, conhecendo sua evolução temporal através de análise das magnitudes dos processos envolvidos. O submódulo chamado praia em equilíbrio, que depende de variáveis dinâmicas como o estado de mar, a variação do nível do mar e a forma em planta da praia, permite calcular a direção do fluxo médio

de energia num ponto ou num perfil escolhido, avaliando a posição da linha de costa da praia.

### 3.6 ÁREA DE ESTUDO

O município de Itapoá situa-se na porção norte da costa do estado de Santa Catarina, com latitude  $26^{\circ}07'01''$  S e longitude  $48^{\circ}36'58''$  W, possuindo aproximadamente 30 km de linha de costa (Silva, et al., 2021). Encontra-se próximo à divisa dos estados de Santa Catarina com o Paraná. A Figura 5 mostra a localização do município de Itapoá. A região litorânea da cidade se estende de Barra Velha, ao Sul, até a Barra do Ribeira, ao Norte. É caracterizada por extensas planícies arenosas e os complexos estuarinos de São Francisco, Guaratuba e Paranaguá (Figura 6). A região possui um regime de micromaré, com amplitudes em torno de 1,5 metros. (ANGULO, et al., 2002).

FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE ITAPOÁ – SC



FONTE: A autora.

O clima da região é predominantemente subtropical úmido, com temperaturas médias anuais que variam entre  $13^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}$ . Dados mostram que a precipitação média anual de 1891,00 mm, tendo fevereiro como o mês mais chuvoso, com média de 299,70 mm, e o mês de julho como o mais seco com 70,20 mm de precipitação,

mostrando que os invernos são mais secos que os verões, porém não apresentam um déficit hídrico significativo, nem a ocorrência de grandes épocas de estiagens (Martins Junior, et al., 2019).

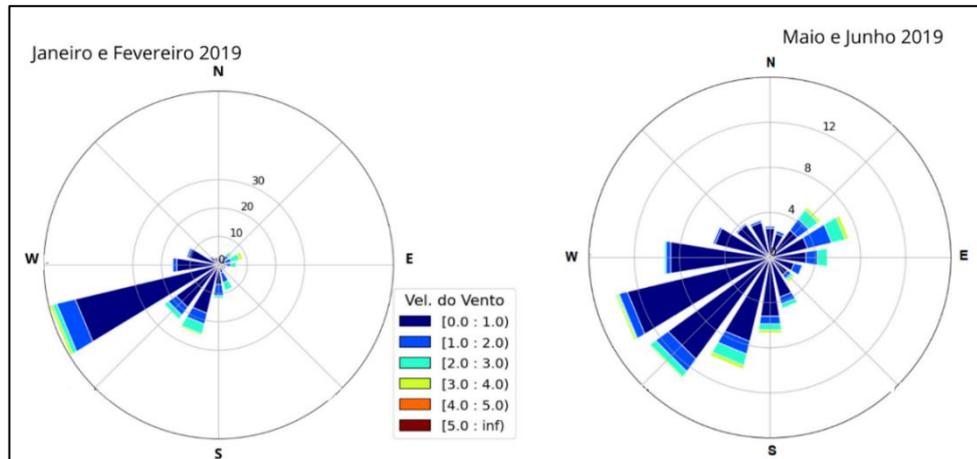
FIGURA 6 - COMPLEXOS ESTUARINOS NA COSTA DO PARANÁ E LITORAL NORTE DE SANTA CATARINA



FONTE: Ângulo & Souza, 2002.

De acordo com dados disponibilizados pelo INMET (Figura 7) para o período de verão entre janeiro e fevereiro de 2019, e para o inverno entre maio e junho de 2019, a direção predominante dos ventos é WSW (Oeste-sudoeste) para o verão, e WSW e SW (Sudoeste) para o inverno, com velocidade média no verão de 0,64 m/s e no inverno 0,44 m/s. A estação automática do INMET em Itapoá possui a seguinte coordenada geográfica: 26°08' S e 48°64' W.

FIGURA 7 - ROSA DOS VENTOS PARA O PERÍODO DE VERÃO DE 2019 E INVERNO DE 2019 NA ESTAÇÃO DE ITAPOÁ- SC.

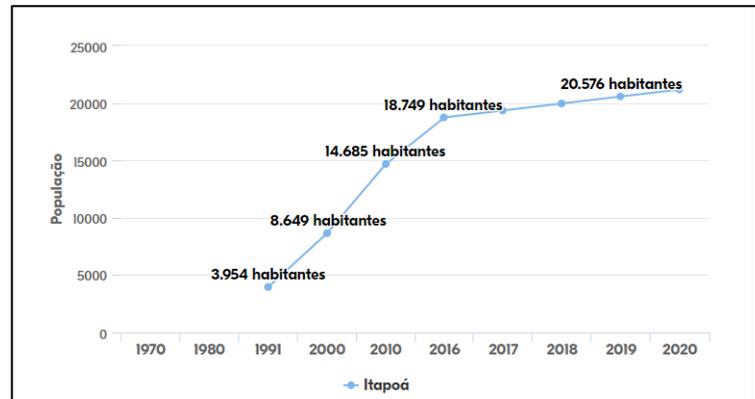


FONTE: INMET. 2019

A cidade de Itapoá apresentou um crescimento elevado nos últimos 30 anos (Figura 8). No ano de 199, a cidade possuía uma população de 3.954 habitantes e, de acordo com o IBGE, a população no ano de 2021, era de 21.766 pessoas, sendo que a população no último censo (2010) era de 14.763 pessoas, com uma densidade demográfica de 59,43 hab/km<sup>2</sup>.

Este aumento populacional está relacionado, principalmente, à construção do Porto de Itapoá, que se localiza na região Sul do Município. O porto é considerado como um dos mais modernos da América Latina na movimentação de contêineres e, como consequência de sua implantação, a cidade necessitou adaptar sua infraestrutura para acompanhar seu funcionamento, tornando o município alvo de investidores, o que resultou na transformação da paisagem natural com a construção de loteamentos residenciais, áreas portuárias, expansão das atividades urbanas, como por exemplo, o intenso fluxo de caminhões ao longo das vias de acesso ao município levando à necessidade de asfaltamento de boa parte da rede viária no entorno e no interior da cidade (Martins Junior, et al., 2019).

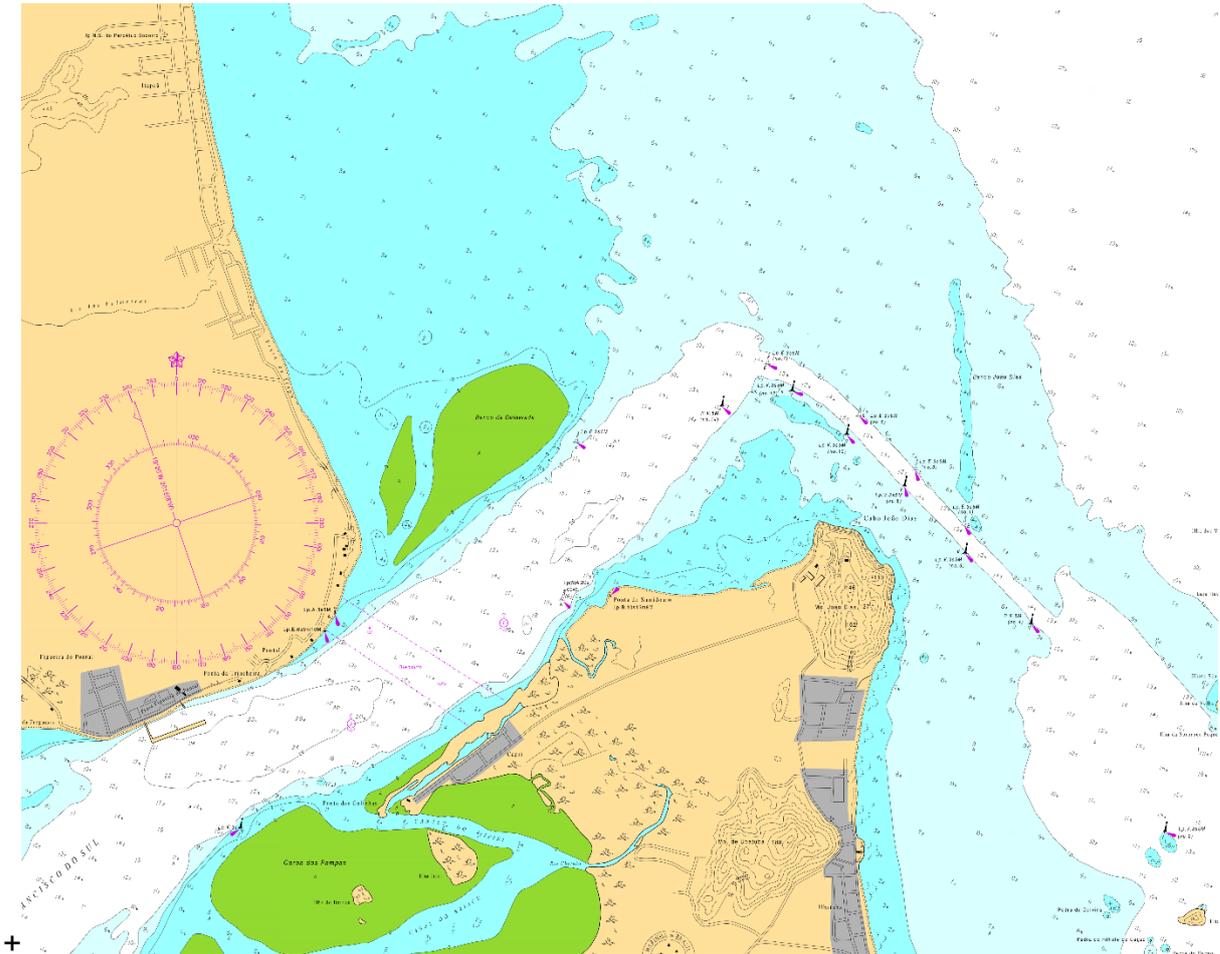
FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE HABITANTES DA CIDADE DE ITAPOÁ - SC NOS ÚLTIMOS 30 ANOS.



FONTE: IBGE – Censo Demográfico; Atlas Brasil 2013 – Censo 2010| Organizado por Datapedia.info.  
Nota Técnica: Dados oficiais do IBGE e estimativas publicadas em D.O.U.

As praias próximas a embocaduras de estuários são influenciadas pelas correntes de marés e pelos deltas de maré vazante associados a elas. A presença do banco da Gualharada, na embocadura da Baía de São Francisco, é resultado da dinâmica da costa de Itapoá (Figura 9), que pode ser interpretado como um delta de maré vazante (ANGULO, et al., 2002).

FIGURA 9 - CARTA NÁUTICA Nº 1804 DA BAÍA DE SÃO FRANCISCO DO SUL.

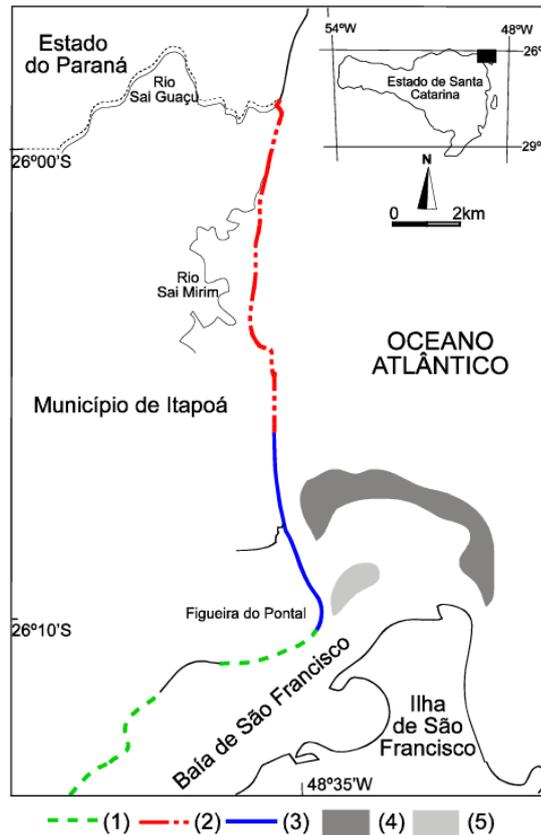


FONTE: DHN (2022)

As areias das praias de Itapoá apresentam granulometria fina, de 0,125mm a 0,25mm, com um aumento no tamanho do grão de Sul para Norte. O tamanho do sedimento e a interação com as ondas controlam a forma da praia e sua dinâmica. Os sedimentos mais finos produzirão praias com menores declividades (entre  $1^\circ$  e  $3^\circ$ ) e praias com sedimentos médios e grossos produzirão inclinações maiores ( $>3^\circ$ ). As praias mais planas possuem as faces praias mais largas, com extensas zonas de espraiamento e surfe, com sedimentos finos e menos permeáveis, bem selecionados com tamanho médio de grão de 0,18mm (Porpilho, 2012).

Angulo et al., 2002 classificaram as praias do litoral de Itapoá a partir de processos que definem sua dinâmica, como: *i*) estuarinas, localizadas dentro da baía de São Francisco, *ii*) de desembocaduras, mas região costeira, sob efeito do delta de vazante da baía, e *iii*) oceânicas ou de mar aberto, na região costeira, sem influência direta da baía de São Francisco (Figura 10).

FIGURA 10 - TIPOS DE PRAIAS DO LITORAL DE ITAPOÁ: (1) PRAIAS ESTUARINAS; (2) PRAIAS OCEÂNICAS OU DE MAR ABERTO; (3) PRAIAS DE DESEMBOCADURA. A REGIÃO (4) REPRESENTA O LOBO FRONTAL DO DELTA DE MARÉ VAZANTE E A REGIÃO (5) A BARRA MARGINAL DO CANAL PRINCIPAL DE VAZANTE DO DELTA.



FONTE: Ângulo & Souza (2002).

As praias da cidade de Itapoá possuem aproximadamente 30 km de extensão, da desembocadura do Rio Saí-Guaçu até a entrada da baía da Babitonga. O rio Saí-Mirim intercepta a linha de costa na região norte, e três pontos rochosos na região central formam duas praias com aproximadamente 200 metros cada uma numa região conhecida como Itapema do Norte (Prefeitura Municipal de Itapoá - Secretaria de Meio Ambiente, 2019).

O setor central, onde se encontram a transição entre as praias oceânicas e as praias de desembocadura, é a região de interesse deste trabalho considerando que este setor apresenta pouca influência da embocadura da baía de São Francisco (também chamada de baía da Babitonga). Esta região tem uma extensão aproximada de 2km (Figura 11).

FIGURA 11 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



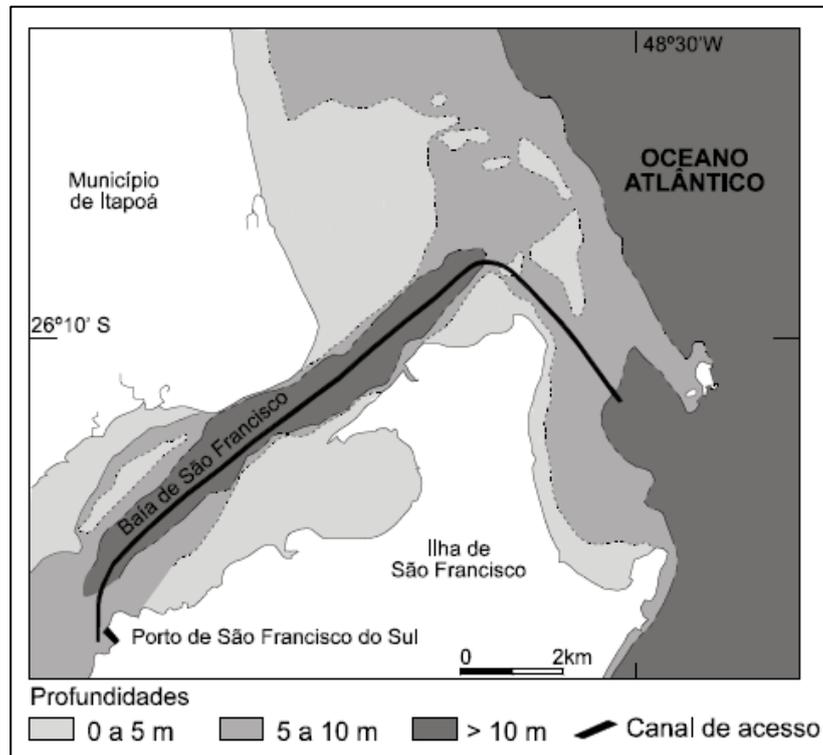
FONTE: A autora.

Estudos sobre a região costeira no litoral norte de Santa Catarina e no Paraná são escassos. Gobbi (1997) estimou que o transporte sedimentar litorâneo na costa paranaense encontra-se na faixa de 100 a 300 mil m<sup>3</sup>/ano, e que o transporte residual ocorre no sentido sul para norte e com magnitude na faixa de 50 a 100 mil m<sup>3</sup>/ano. Já na região de Itapoá não existem dados sobre volumes de areia movimentada pela deriva litorânea. Possivelmente, a baía da Babitonga tornou-se um potencial fornecedor de sedimentos a serem transportados pelas correntes de deriva litorânea, sendo que os sedimentos que se assentam no canal podem se depositar ou serem transportados por correntes de maré vazante para áreas profundas, causando diminuição do volume do delta e, conseqüentemente, erosão das praias e da planície costeira situadas à norte (Souza, 1999). A Figura 12 mostra a região com a batimetria do canal de acesso ao porto de São Francisco do Sul e a extensão do banco de areia.

Estudo realizado por Souza & Angulo (2006) mostra que o setor central, que compreende praias de mar aberto, sofreu variações da linha de costa inferior a 10,0 metros entre 1957 e 1995. O monitoramento dos perfis praias realizados entre os

anos de 1996 e 2002 indicou um recuo médio de 10,91m (1,78m/ano) da linha de costa. Este recuo destruiu algumas propriedades e a faixa de dunas existentes, como pode ser observado na Figura 13, com registros fotográficos realizados na região nos anos 1996 e 1997. São duas as hipóteses levantadas pelos autores para explicar o fenômeno de erosão ocorrido. A primeira relaciona-se com a ocorrência de fenômenos do tipo El Niño/La Niña, que alteram o padrão climático devido às variações na temperatura superficial das águas do Oceano Atlântico, alterando o clima de ondas; a segunda, e principal hipótese levantada pelos autores, é que o déficit está sendo causado pelas dragagens da baía da Babitonga que dá acesso ao porto de São Francisco que se localiza ao sul do município de Itapoá.

FIGURA 12 – REGIÃO DO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL.



FONTE: Ângulo & Souza (2006)

Uma parte do canal dragado se encontra na região frontal do delta de maré vazante, onde as profundidades, no fim da década de 70, eram de 3 a 6 metros. Já no fim da década de 80, o canal sofreu dragagens, deixando-o com profundidades por volta dos 11 metros. Levando em consideração os sistemas preferenciais de ondas do litoral de Itapoá, SSE/SE, existe troca de sedimentos entre as praias e o delta, para as direções Norte e Sul, tendo o predomínio de transporte para Norte.

FIGURA 13 - REGISTROS FOTOGRÁFICOS REALIZADOS NA REGIÃO ENTRE AGOSTO DE 1996 E SETEMBRO DE 1997, MOSTRANDO RECUO NA LINHA DE COSTA -



FONTE: Ângulo & Souza, 2002.

## 4 METODOLOGIA

Neste trabalho, o SMC-Brasil será utilizado para avaliar a evolução temporal da linha de costa da praia de Itapoá-SC e, assim, compreender a dinâmica marinha e sedimentar da área de estudo. Este estudo considera a análise dos processos litorâneos longitudinais ao longo do tempo, levando em consideração processos litorâneos de curto prazo, como a erosão ocasionada por um evento de tempestade.

Como as ondas que incidem no litoral são o principal mecanismo responsável pela erosão, é necessário definir o estado de mar, a geração e a propagação da onda até a praia. São três as etapas necessárias para se gerar ondas e propagá-las até uma praia brasileira através do SMC-Brasil, mostradas na Figura 14. A primeira etapa é a reanálise global que gerou um conjunto de pontos chamado de pontos GOW (*Global Ocean Waves*). Esta etapa foi realizada pelo IH Cantabria, que simulou numericamente condições de ondas durante um período de 60 anos sobre a superfície dos oceanos, aplicando as forçantes atmosféricas globais (MMA, 2018)

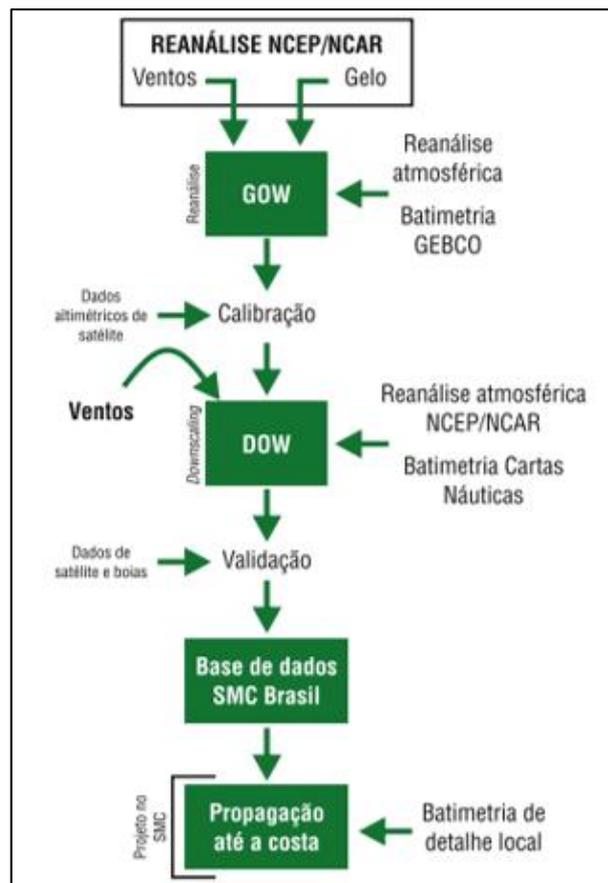
Utilizou-se para a realização desta modelagem uma malha global de  $1,5^{\circ} \times 1^{\circ}$ , destacando a zona oceânica brasileira utilizando uma malha com uma resolução maior, de  $0,25^{\circ}$  ( $\frac{1}{4}$  de grau), obtidas através de bases de dados *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO).

O modelo *Wave Watch III*, versão 2.2, foi utilizado na simulação numérica, sendo forçado com a reanálise atmosférica NCEP/NCAR (a qual inclui variabilidade de ventos globais e de cobertura de gelo) sobre a batimetria global, também obtida pela GEBCO. Os resultados consistem num conjunto de séries horárias de estados de mar para cada um dos nós das malhas. Isto é, obtiveram-se séries de estados de mar de longa duração a intervalos de 1 hora e séries temporais a cada  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  para a zona litorânea brasileira. Esta reanálise denomina-se GOW. (MMA, 2018).

Para cobrir toda a costa brasileira, 17 malhas retangulares foram projetadas, com resolução de aproximadamente 1km x 1km levando em consideração o fato de que o limite em águas profundas coincidissem com a posição dos pontos GOW. Pontos GOW foram selecionados para cada uma das malhas levando em consideração a variabilidade espacial das condições da onda. Os pontos GOW foram calibrados utilizando dados de altímetros (satélites), para evitar possíveis desvios nos resultados (MMA, 2018).

Os parâmetros obtidos para cada nó das malhas foram: altura significativa de onda ( $H_s$ ), período médio ( $T_m$ ), período de pico ( $T_p$ ), direção de pico ( $\theta_p$ ), dispersão direcional, direção média ( $\theta_m$ ) e espectros de energia. A altura significativa de onda ( $H_s$ ) é definida como o valor médio do terço das maiores ondas de um estado de mar. Pode ser subdividido em  $H_{s50\%}$ , que é a altura de onda em condições médias, e  $H_{s12}$ , a altura de onda associada à tempestade média anual. Para o presente trabalho adotar-se-ão os valores de  $H_{s50\%}$  e  $H_{s12}$  nos estudos (MMA, 2018).

FIGURA 14 - METODOLOGIA PARA PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO SMC-BRASIL



FONTE: MMA (2017).

A segunda etapa é a transferência dinâmica para águas Intermediárias, chamada de *Downscaled Ocean Waves* (DOW). Esta etapa consiste na realização de um *downscaling* com objetivo de proporcionar características regionais para a base de dados, pois os dados GOW tem características globais, principalmente pelo fato da baixa qualidade da batimetria nas áreas mais rasas (MMA, 2018).

A base de dados GOW foi utilizada como condição de contorno, com dados de cada nó com séries espectrais com durações de 60 anos (1948 – 2008), com resolução de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  ao longo da costa brasileira.

Para a realização desta simulação levou-se em consideração o fato de que as ondas na costa são produtos da combinação de ondas geradas longe da costa e ondas geradas por ventos locais. Sendo assim, necessitam-se introduzir dados de ventos locais nas simulações para que a realização do *downscaling* seja efetiva.

Os dados de onda GOW, e as funções de transferência DOW obtidos, permitem a realização de estudos na costa brasileira, porém é necessário realizar a transferência deles até a costa com uma maior resolução espacial. A terceira etapa é realizada para cada praia estudada, pois a transferência de ondas é influenciada por características locais da área, como a batimetria, por exemplo. É possível introduzir dados batimétricos com maior detalhe do que os obtidos através das cartas náuticas. Então deve-se realizar simulações numéricas no modelo de propagação de ondas OLUCA. Este modelo, parabólico, resolve a fase e tem algumas características que permitem propagar as ondas até a costa levando em conta os principais processos físicos aos quais as ondas estejam sujeitas até a quebra, como a refração-difração, que os modelos usados nas etapas anteriores não resolvem (WWIII e SWAN). No entanto, este modelo tem requisitos específicos que fazem com que se invista um esforço importante na geração das malhas de propagação. Para realizar a transferência da série de estados de mar, é necessário novamente realizar uma classificação da série reconstruída dos pontos DOW. Para isso se emprega a mesma técnica utilizada na segunda parte da metodologia. Posteriormente, é escolhida a malha mais adequada para cada caso selecionado e são realizadas as simulações. Finalmente as séries são reconstruídas utilizando novamente a técnica de interpolação (MMA, 2018).

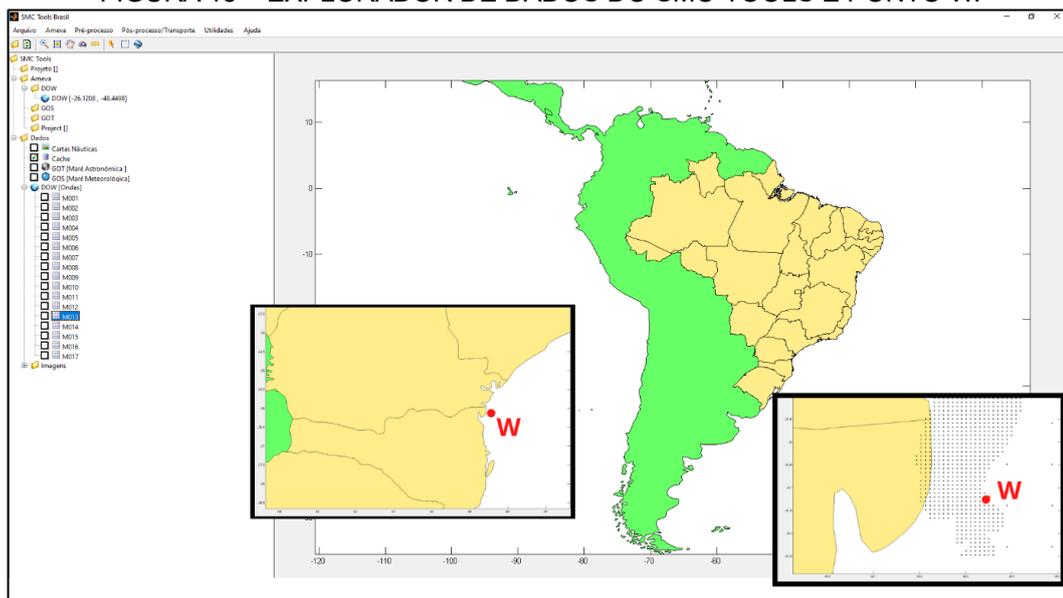
#### **4.1 DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO**

Inicialmente a região de interesse/estudo é escolhida. Após a escolha, um estudo de levantamento das ondas da região é realizado no SMC-Tools para que se encontre a onda que melhor represente o padrão local. O explorador de dados do SMC-Tools é utilizado para que a seleção da região seja feita. Na Figura 15 pode-se observar os pontos GOWs e DOWs e o mapa da América do Sul.

Dentro do submódulo IH-DATA, a série temporal de ondas é disponibilizada nos pontos DOWs, permitindo definir o clima local de ondas e estados de mar. O submódulo IH-AMEVA é utilizado para que as características das ondas possam ser coletadas, definidas e visualizadas. Este submódulo permite ao usuário visualizar dados de período, amplitude, frequência, direção, dados de marés, clima de ondas e regimes médios e extremos.

A fim de avaliar o clima de ondas, o ponto DOW escolhido para este trabalho possui a localização  $26^{\circ}07'15.6''\text{S}$  e  $48^{\circ}27'00''\text{O}$  e foi denominado como ponto W (FIGURA 15). Das 17 áreas em que o Brasil foi subdividido no SMC-Brasil, a praia de Itapoá encontra-se na área M13, que engloba o litoral norte de Santa Catarina, litoral paranaense e litoral sul de São Paulo. O ponto foi escolhido na região com profundidade em torno de 20m e a distância até a costa não ultrapassasse 20km, condição necessária para que a base de dados DOW, gerada pelo modelo SWAN, seja eficiente.

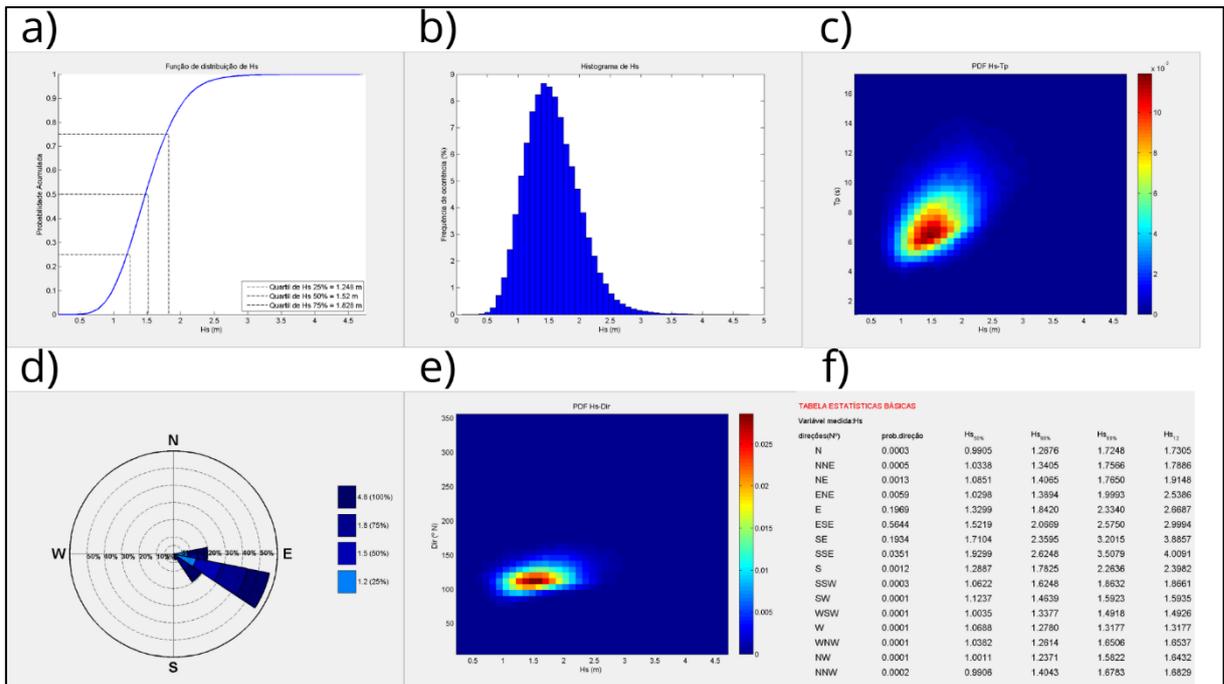
FIGURA 15 – EXPLORADOR DE DADOS DO SMC-TOOLS E PONTO W.



FONTE: A autora.

Após a definição do ponto W, o submódulo IH-AMEVA realizou as análises estatísticas do ponto. Neste submódulo, informações como período, amplitude, frequência, direção, marés e clima de ondas podem ser obtidos. As Figura 16 e 17 mostram um exemplo dos resultados obtidos para o ponto W.

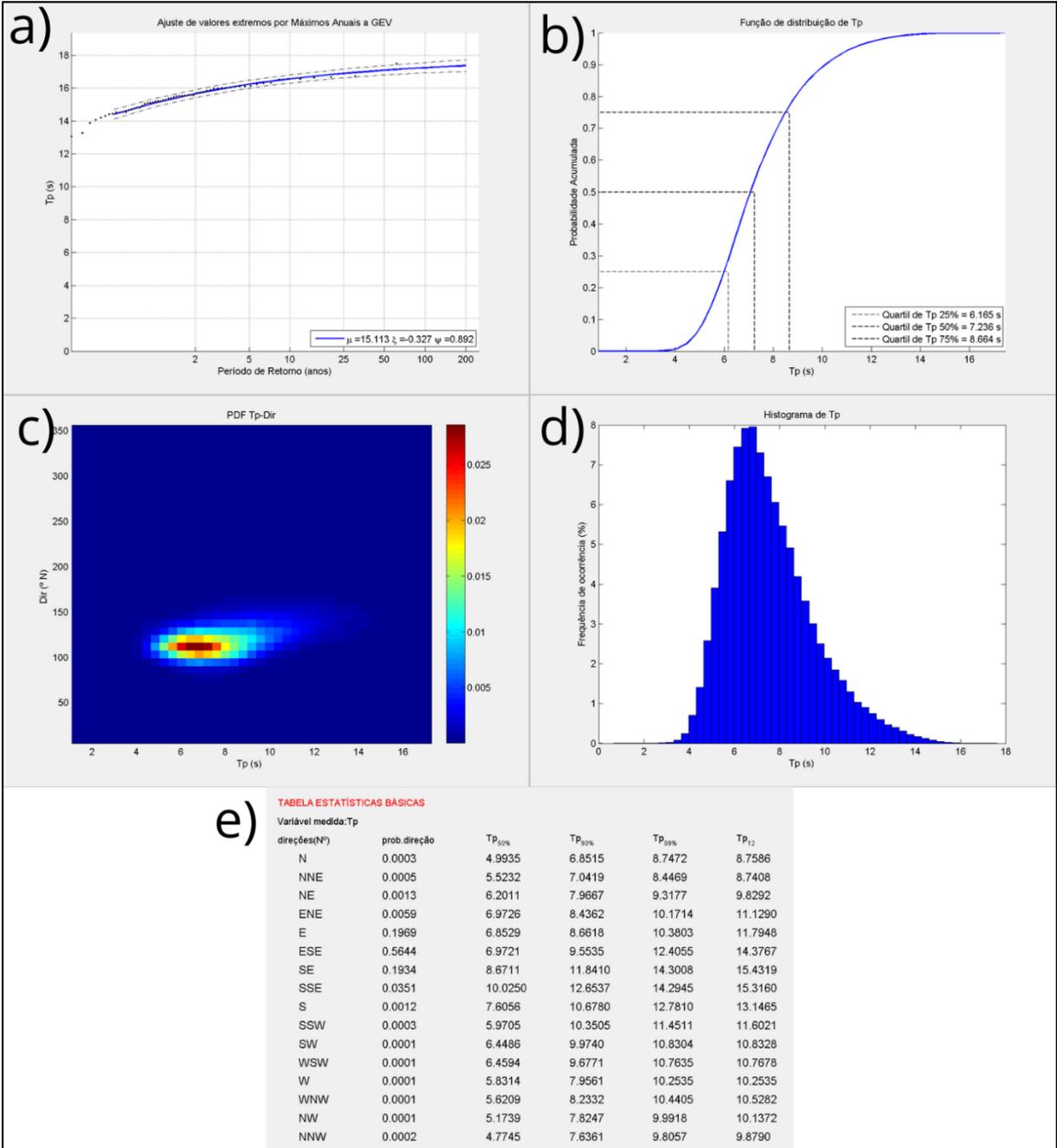
FIGURA 16 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA PARA O PONTO W: (A) A FREQUÊNCIA (B) O HISTOGRAMA DE HS; (C) A DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA HS E TP; (D) A ROSA DE DIREÇÃO DE ONDAS, (E) A DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA HS E A DIREÇÃO MÉDIA DE ONDA; (F) OS PRINCIPAIS PARÂMETROS DAS ONDAS EM CADA DIREÇÃO.



FONTE: A autora.

A Figura 16 mostra os parâmetros estatísticos para o período de pico da onda, sendo possível observar a probabilidade de retorno de cada período de onda, a frequência acumulada do período de pico da onda, a distribuição conjunta do período de pico e a direção média da onda, o histograma das classes de período de pico e suas frequências de ocorrência e, por fim, os períodos de pico versus direção.

FIGURA 17 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE PERÍODO DE PICO DA ONDA: A) RELAÇÃO PERÍODO DE RETORNO E PERÍODO DE ONDA; (B) FREQUÊNCIA ACUMULADA DO PERÍODO DE PICO DA ONDA; (C) DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA DO PERÍODO DE PICO E A DIREÇÃO MÉDIA DA ONDA; (D) O HISTOGRAMA DO PERÍODO DE PICO; (E) PERÍODO DE PICO VS. DIREÇÃO.



FONTE: A autora.

## 4.2 DEFINIÇÃO DA MALHA DE ESTUDO

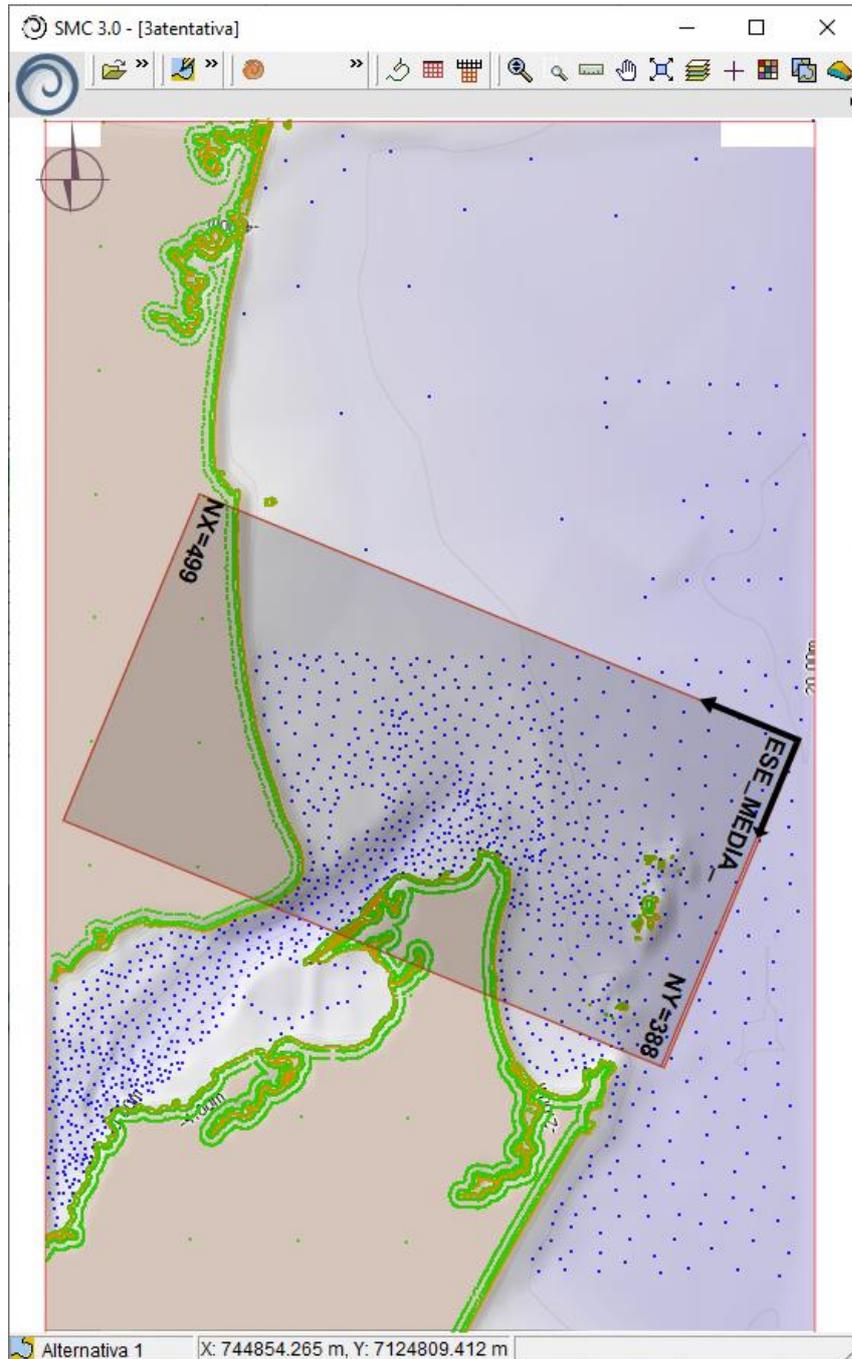
A propagação do estado de mar na área de estudo, definido no SMC-Tools, é realizada no módulo SMC 3.0. O nível de referência batimétrico utilizado pelo SMC 3.0 é o nível de redução, i.e., nível médio das baixa-mares de sizígia (MLWS), que é o nível de referência das cartas náuticas disponibilizadas no Módulo IH-DATA. O SMC-Brasil trabalha com cotas batimétricas, ou seja, cotas submersas recebem valores positivos e as cotas emersas valores negativos.

Para se realizar as simulações referentes à propagação da onda é necessário definir a malha que será utilizada e o sentido de propagação das ondas ou do espectro de ondas. Foram definidas duas malhas para a região do ponto W, uma para a direção leste-sudeste (ESE) (FIGURA 18) e outra para a direção sudeste (SE) (FIGURA 19). A definição da malha seguiu as recomendações do SMC-Brasil em relação ao espaçamento, a fim de proporcionar uma melhor resolução dos fenômenos que ocorrem na área de estudo.

As análises do ponto W mostram que as ondas em condições médias são provenientes de Leste-Sudeste (segundo quadrante) em 56% do tempo, com altura significativa ( $H_{s50\%}$ ) de 1,5219m e com período de pico ( $T_{p50\%}$ ) de 6,9721s. Já as ondas em condições de tempestade mostraram sentido proveniente de Leste-Sudeste em 56% do tempo, com altura significativa ( $H_{s12}$ ) de 2,9994m e período de pico de ( $T_{p12}$ ) de 14,3767s.

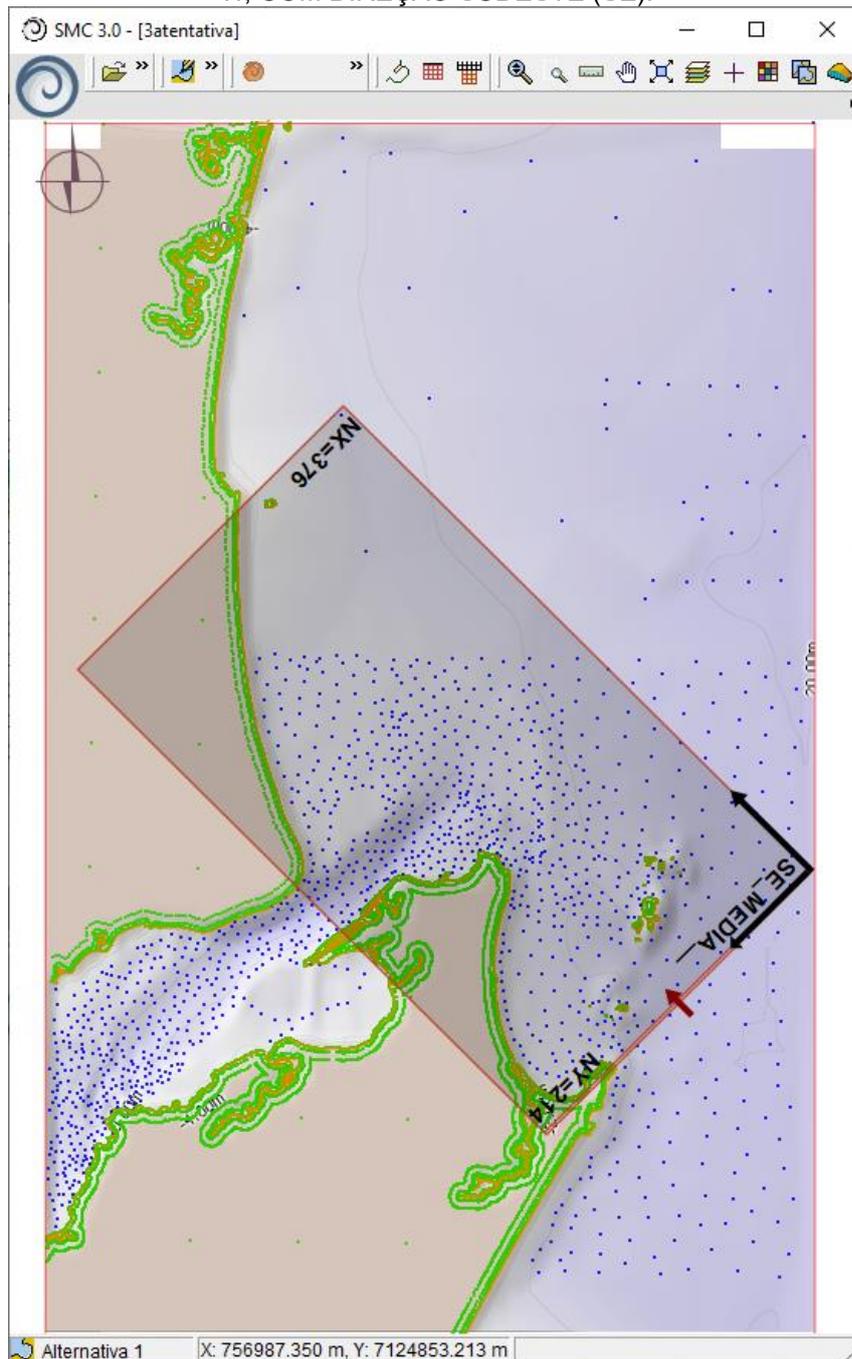
A partir destas informações, a malha ESE foi construída utilizando o espaçamento entre os nós de 36,98 m na direção X e 26,10 m na direção Y, com 499 pontos na direção de propagação e 388 pontos de cálculo na direção transversal, e a malha SE foi construída utilizando o espaçamento entre os nós de 50,06 m na direção X e 50,03 m na direção Y, com 376 pontos na direção de propagação e 214 pontos na direção transversal.

FIGURA 18 - MALHA DEFINIDA PARA A PROPAGAÇÃO DE ONDAS A PARTIR DO PONTO W, COM DIREÇÃO LESTE-SUDESTE (ESE).



FONTE: A autora.

FIGURA 19 - MALHA DEFINIDA PARA A PROPAGAÇÃO DE ONDAS A PARTIR DO PONTO W, COM DIREÇÃO SUDESTE (SE).



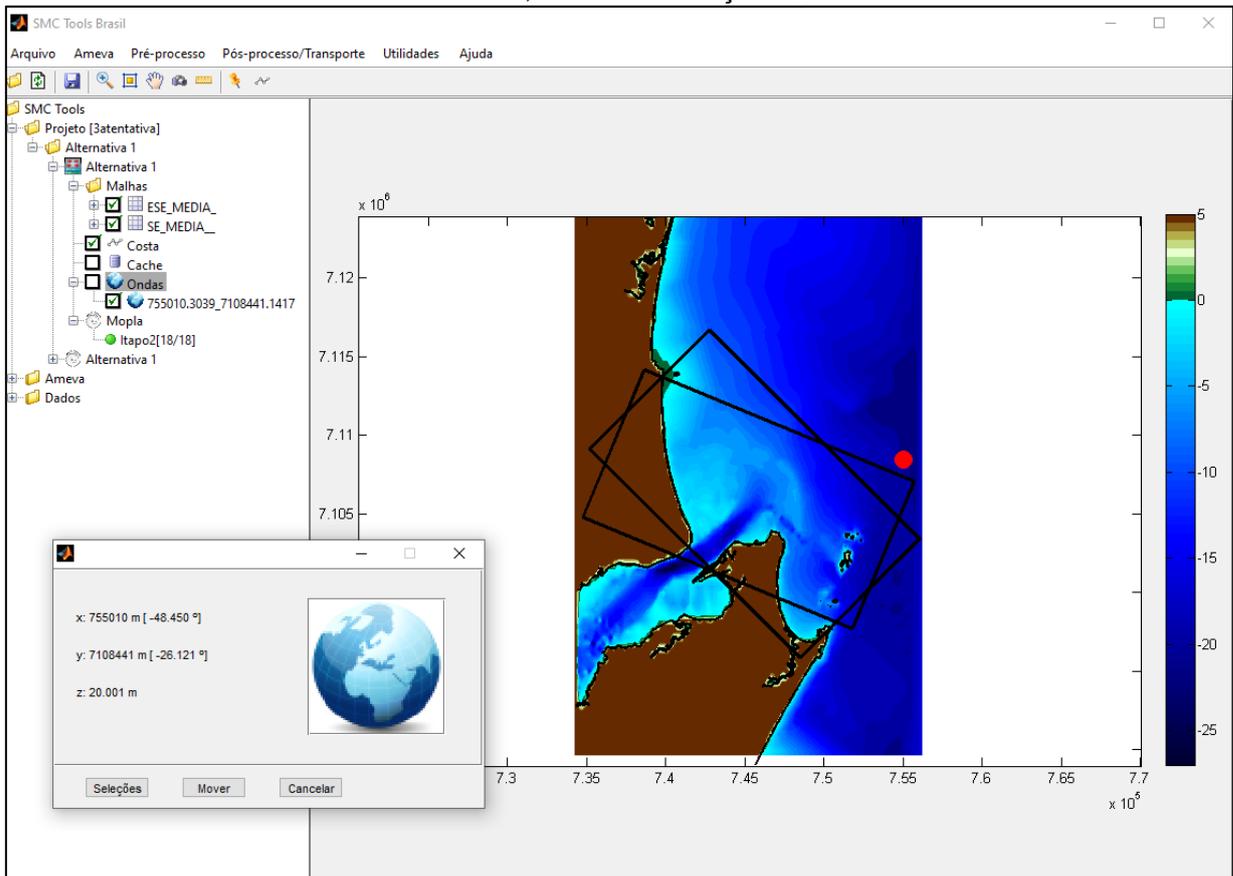
FONTE: A autora.

Após a definição das malhas, é possível propagar ondas através do modelo numérico espectral de propagação de ondas (OLUCA-SP) e, após os cálculos para o ponto W, ondas a partir do ponto DOW selecionado serão propagadas nas direções escolhidas através do SMC-Tools.

### 4.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS

O submódulo IH-DYNAMICS é utilizado na etapa final das análises. Na interface do SMC-Tools é possível visualizar a malha e a onda definida para propagação (FIGURA 20).

FIGURA 20 – SAÍDA DO SMC, COM A DEFINIÇÃO DAS MALHAS E DO PONTO W.



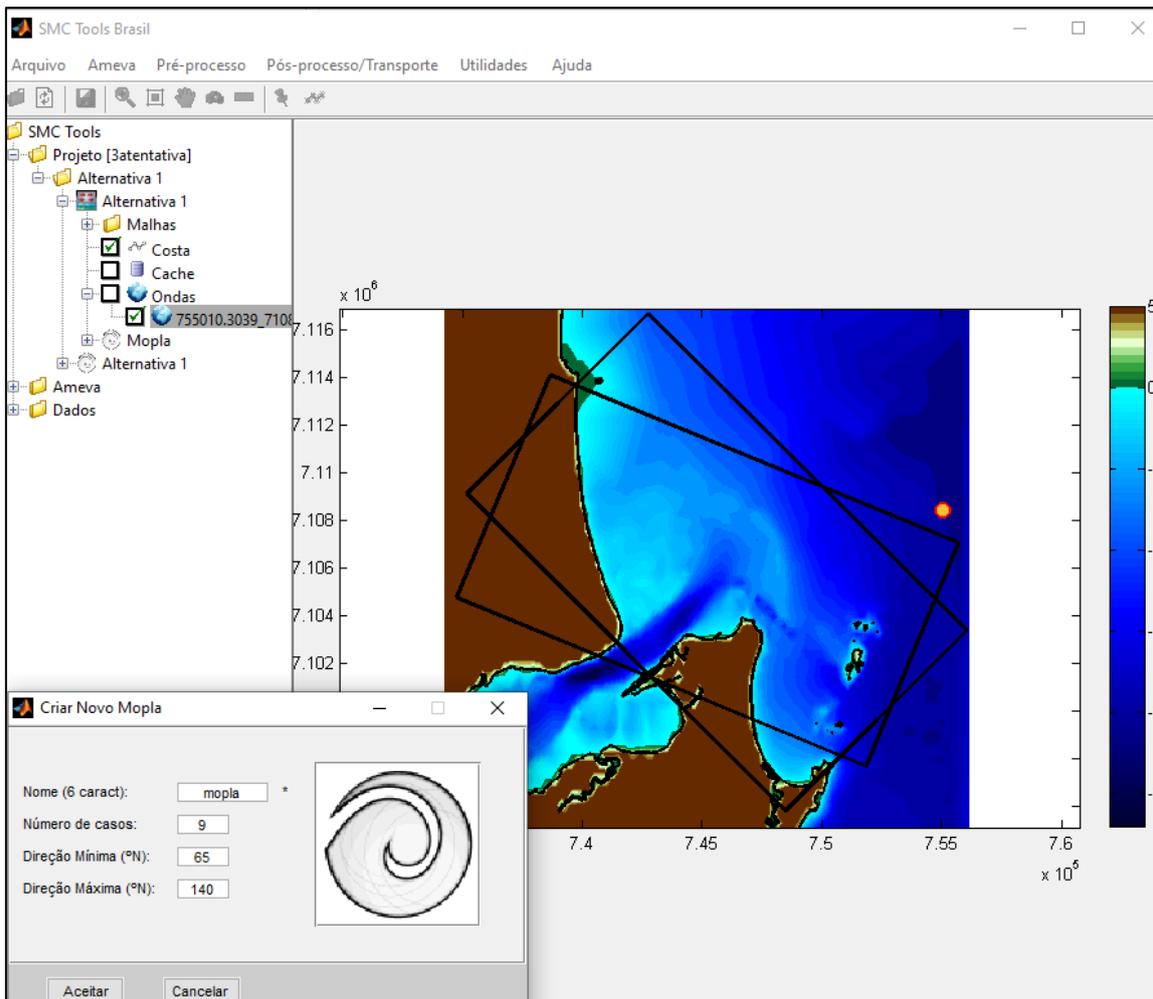
FONTE: A autora

Nesta etapa do projeto é feita a seleção do número de casos que será propagado, ou seja, as ondas representativas, utilizando os 60 anos de dados disponíveis (1948 a 2008). O método de Booij (1981) é aplicado ao modelo de ondas do Oluca, fazendo com que as ondas propagadas estejam dentro da faixa de  $\pm 50^\circ$  da principal direção de propagação. A fim de cumprir este critério proposto, a direção de sudeste está dentro da faixa de  $\pm 25^\circ$  em relação a direção principal (leste-sudeste).

O MOPLA, que simula a evolução morfodinâmica das praias, na escala de curto prazo, será utilizado para o ponto W. As direções máximas e mínimas escolhidas,  $65^\circ$  a  $140^\circ$ , foram definidas baseadas nas direções das ondas observadas no ponto W. A

FIGURA 21 mostra a tela do SMC onde foi estabelecido os casos, considerando o litoral de Itapoá. Também é possível observar a variação batimétrica da região, obtida através das cartas náuticas. As malhas utilizadas no estudo foram escolhidas de tal forma que grande parte das direções de entrada de ondas fossem cobertas. Também foram considerados os efeitos de borda na escolha da área de interesse.

FIGURA 21 – SAÍDA DO SMC-BRASIL, COM A DEFINIÇÃO DOS CASOS A SEREM PROPAGADOS (MOPLA) E A BATIMETRIA DA REGIÃO.



FONTE: A autora.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

Na análise do processo erosivo são usados o SMC-Brasil, imagens de satélite fornecidas pelo catálogo de imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) analisadas pelo QGIS, imagens históricas fornecidas pelo Google Earth Pro e aerofotos fornecidas pelo Governo do estado de Santa Catarina. No módulo SMC-Tools é possível realizar a avaliação da arrebentação das ondas, calcular o

transporte de sedimentos e o fluxo de energia da região de estudo, levando em consideração a região onde existe influência das ondas.

Na primeira parte da análise das imagens, este trabalho utiliza imagens de satélite provenientes do Google Earth Pro. O programa, que é gratuito, disponibiliza uma série temporal de imagens. Para o estudo, duas imagens de satélite foram utilizadas: uma do dia 04/07/2011 e a outra do dia 06/02/2021, com aproximadamente 10 anos de diferença entre uma e outra. Dois vetores, um para cada ano, de modo que circundem todo o limite vegetação-areia da costa foram confeccionados. Dentro da região escolhida como área de interesse no estudo, foram selecionados 27 pontos, nos quais a distância entre cada um dos vetores marcadores do limite foi medida com objetivo de, qualitativamente, observar padrões de erosão associados ao acentuado crescimento populacional da cidade de Itapoá-SC.

A segunda parte do estudo dar-se-á através da análise de aerofotos disponibilizadas pela Secretaria de Estado do Planejamento de Santa Catarina (SPG), com imagens no formato *tif* do ano de 1957, a fim de compreender a dinâmica do crescimento da cidade ao longo dos anos até o período de pico do crescimento populacional. Para a comparação entre as imagens, é necessário adotar uma linha de referência, pois a linha de costa é um limite móvel e sua posição espacial varia com o tempo. Nesta fase do estudo adotar-se-á a definição sugerida por Crowell et al. (1991), que define a linha de costa como a posição da interface terra-mar, marcada pelo limite atingido durante as preamares de sizígia.

#### **4.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

A média anual do transporte de sedimentos foi calculada a partir dos dados de estados de mar mais relevantes. Estes estados foram selecionados através do método de Máxima Similaridade incluído no módulo IH-Dynamics do SMC-Tools. Foram selecionados 9 estados de mar que foram propagados até a costa em dois níveis de maré: baixa mar (0,0 m) e preamar (1,8 m).

Perfis de praia foram traçados perpendicularmente à praia a fim de obter dados de transporte de sedimentos. Este transporte é representado por setas posicionadas nas laterais dos perfis de praia. Valores positivos são para sedimentos transportados para a direita, e negativos sedimentos transportados para a esquerda, levando em consideração um observador parado na praia observando o mar.

De acordo com (MMA, 2018) a onda é a principal forçante do transporte litorâneo longitudinal, também são responsáveis fenômenos associados a ela, pois estes definem condições de contorno, granulometria dos sedimentos e a morfologia das praias juntamente com a batimetria. Esse transporte longitudinal pode ser calculado por diversas equações e metodologias; o SMC-Brasil utiliza as equações de CERC (1984), de Kamphuis (1991) e a proposta por Bayram *et al* (2007) A equação de CERC (1) relaciona a taxa de transporte longitudinal de sedimentos com o fluxo de energia longitudinal.

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)} \frac{1}{16} \rho g^{\frac{3}{2}} H_b^{\frac{5}{2}} \gamma_b^{-\frac{1}{2}} \sin 2\alpha_b \quad (1)$$

Sendo  $K$  uma constante;  $H_b$  a altura de arrebatamento da onda;  $\alpha_b$  o ângulo de quebra da onda;  $\gamma_b$  o índice de quebra da onda;  $g$  a aceleração gravitacional;  $\rho$  a densidade da água e  $\rho_s$  a densidade do sedimento.

Os dados utilizados para o transporte de sedimentos encontram-se na TABELA 1, onde o valor médio da granulometria dos sedimentos foi obtido através do estudo realizado por Silva (2018). A TABELA 1 mostra os dados utilizados para os cenários com diferentes estados de mar: direção Leste-Nordeste em um regime de ondas médio (ESE MED), direção Leste-Nordeste em um regime de ondas de tempestade (ESE TEMP) e direção sudeste em um regime de ondas médio, a tabela exemplifica os dados utilizados apenas no regime ESE MED, pois os dados utilizados para os dois outros casos são semelhantes, alterando apenas o intervalo de tempo do modelo.

TABELA 1 - DADOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA TRÊS DIFERENTES CENÁRIOS: ESE MED, ENE TEMP. E SE MED..

<b>Características do sedimento</b>	
	ESE MÉD
$D_{50}$ (mm)	0.25
$D_{90}$ (mm)	0.3
Ângulo de atrito (°)	35
$\rho_s$ (Ton/m <sup>3</sup> )	2.65
Porosidade	0.4
$\sigma_d$	1.2
<b>Características da água</b>	
$\rho_w$ (Ton/m <sup>3</sup> )	1.025
Viscosidade (m <sup>2</sup> /s)	0.000006

<b>Características da Simulação</b>	
<i>Estudo da Sedimentação</i>	X
<i>Evolução morfodinâmica</i>	
<i>Duração do evento (h)</i>	12
<i>Variação máxima do fundo (m)</i>	0.1
<b>Modelo</b>	
<i>Bailard</i>	
<i>Soulsby</i>	X
<i>Tempo total (s)</i>	500
<i>Intervalo (s)</i>	3

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISE DO PONTO W

De acordo com a análise estatística, as direções predominantes das ondas no ponto W são de Leste-Sudeste (ESE), tendo 56% das ondas vindas desta direção, para os climas médio e extremo. A segunda direção com maior probabilidade é de ondas vindas de Sudeste (SE), com 19% de probabilidade. A altura de onda em condições médias e de tempestade variam entre as duas principais direções. A Tabela 2 mostra um resumo dos resultados da análise estatística realizada pelo SMC-Brasil.

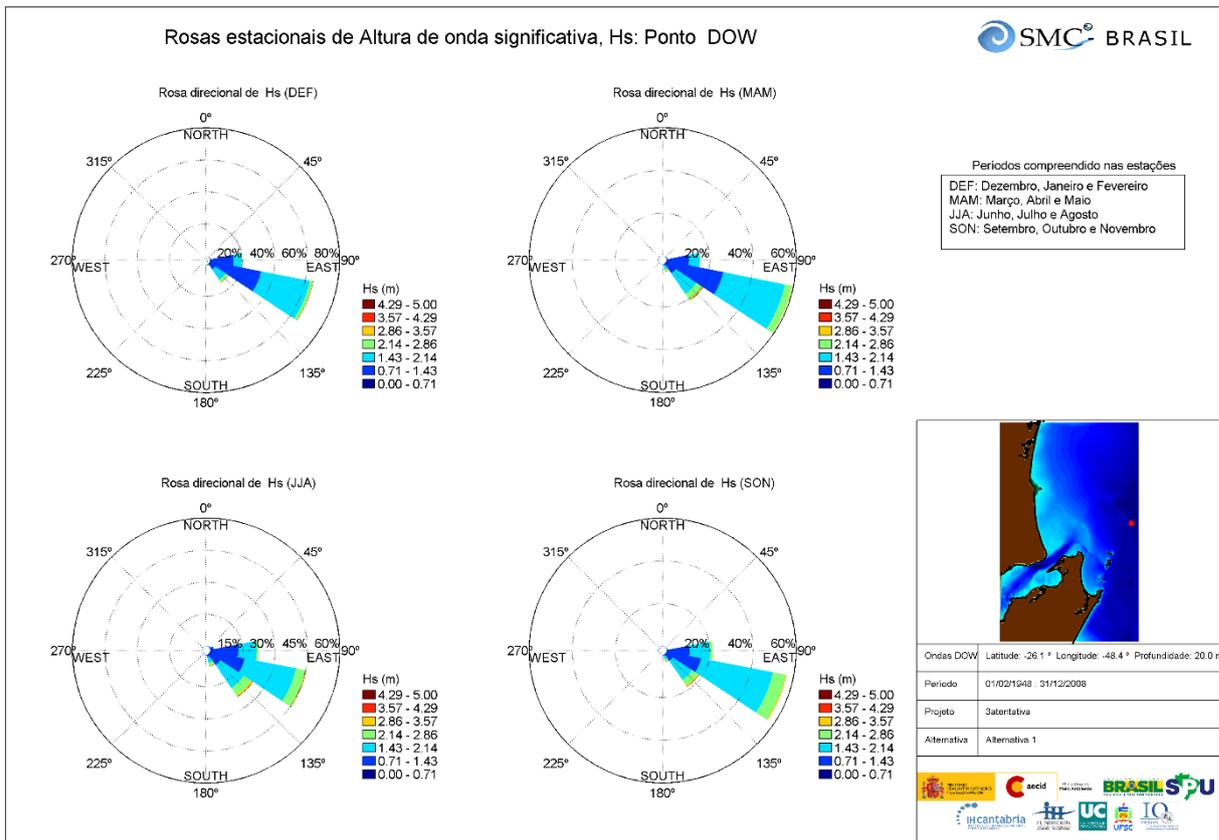
TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS NO PONTO W.

Direção	Probabilidade	Hs <sub>50%</sub> (m)	Tp <sub>50%</sub> (s)	Hs <sub>12</sub> (m)	Tp <sub>12</sub> (s)
ESE	0.5644	1.5219	6.9721	2.9994	14.3767
SE	0.1934	1.7104	8.6711	3.8857	15.4319

FONTE: A autora.

A FIGURA 22 mostra as rosas de ondas classificadas por estações do ano. Observa-se que as ondas provenientes de ESE e SE ocorrem em todas as estações do ano, porém as ondas provenientes de ESE possuem maior probabilidade de ocorrência. As alturas de onda predominantes em todas as estações do ano, nas duas direções predominantes estão na faixa de 1,43 a 2,14 m. No inverno e na primavera, ocorrem ondas com alturas maiores, entre 2,14 e 2,89 m, de forma mais significativa.

FIGURA 22 - ROSAS DE ONDAS DO PONTO W PARA CADA ESTAÇÃO DO ANO: VERÃO, OUTONO, INVERNO E PRIMAVERA.



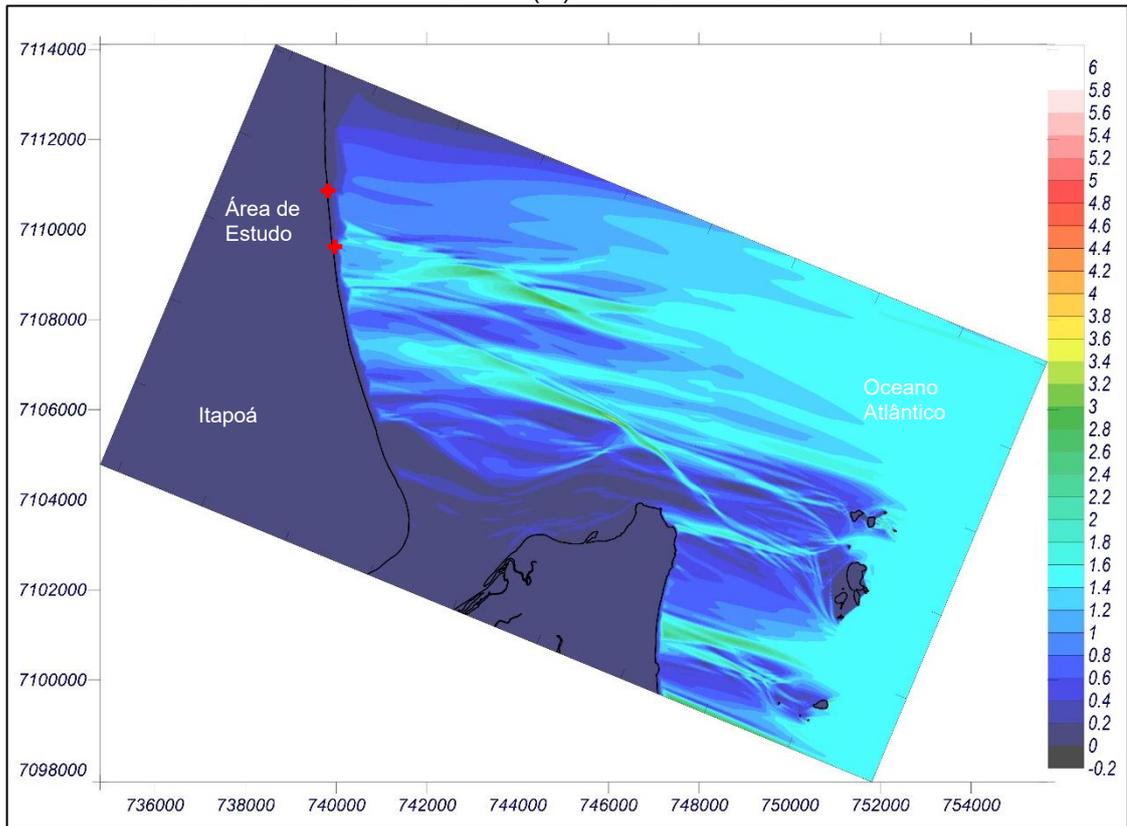
FONTE: A autora.

Apenas a maré astronômica foi considerada no estudo, tendo em vista que a maré meteorológica é determinante em eventos extremos. Os níveis de maré considerados foram de 1,8 m para a preamar (EPAGRI, 2022), e 0,0 m para baixa mar de sizígia.

## 5.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS

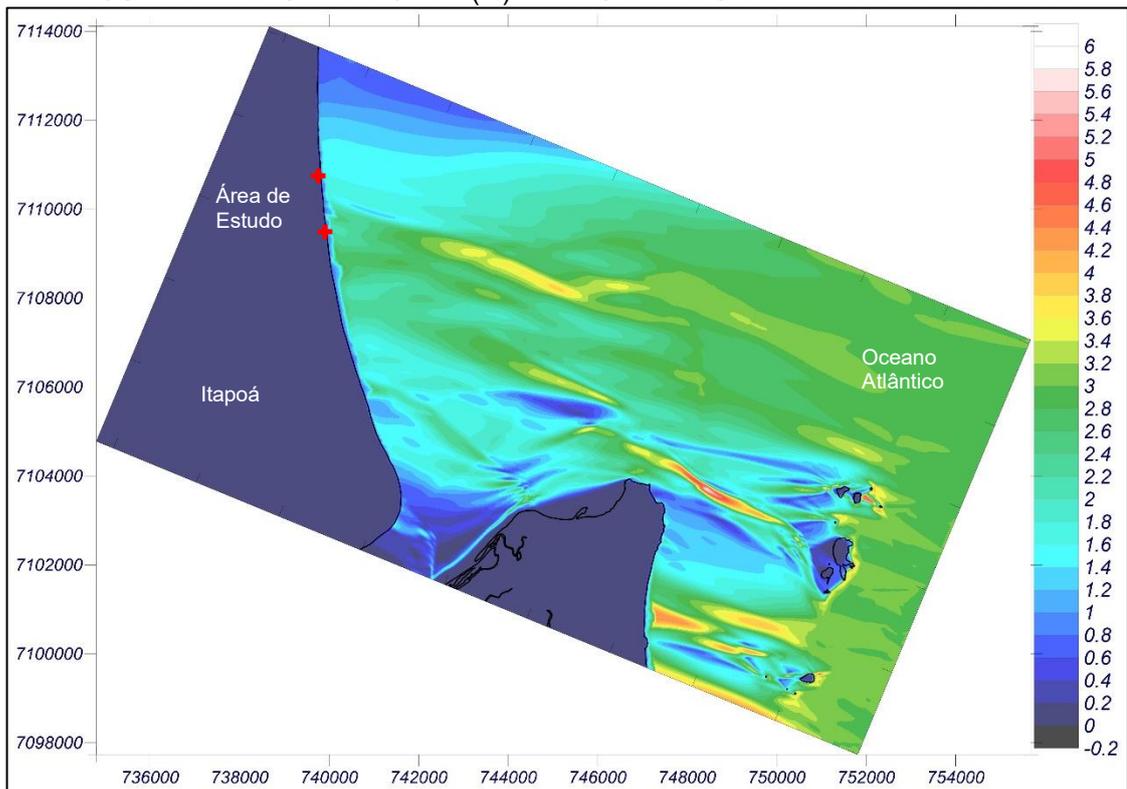
Os resultados do modelo para o clima de ondas médio mostram alturas de onda maiores na região central do arco praial e alturas menores na região próxima do banco de areia (FIGURA 23). Já para o clima de ondas de tempestade, grandes alturas de onda, na ordem de 3 m, constituem grande parte das ondas que chegam ao litoral, possuindo também um corredor de grandes alturas de onda, podendo ser causado pela difração das ondas que ocorre pela presença das ilhas e da topografia da região, ou por alguma inconsistência no modelo (FIGURA 24).

FIGURA 23 – ALTURA DE ONDA (m) PARA O ESTADO DE MAR MÉDIO.



FONTE: A autora.

FIGURA 24 - ALTURA DE ONDA (m) PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.



FONTE: A autora.

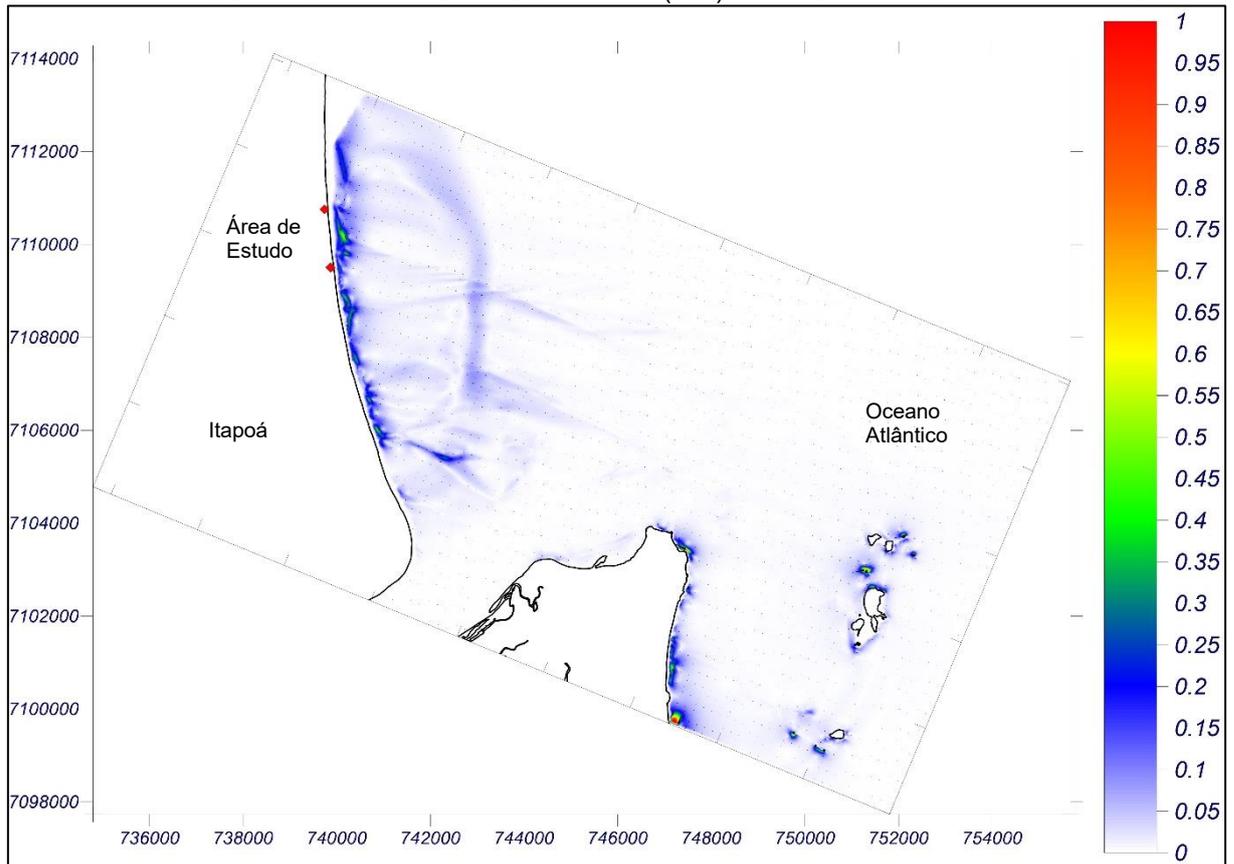
Os resultados sugerem uma possível tendência a erosão na área de estudo, coincidindo com a região onde as ondas possuem grandes alturas, principalmente para o estado de mar de tempestade (FIGURA 23 e FIGURA 24)

Ondas com alturas maiores são observadas com maior frequência no regime de ondas de tempestade. Observa-se que as ilhas causam uma diminuição significativa na altura das ondas que se direcionam para a porção sul da praia de Itapoá, porém a região mais ao norte, onde encontra-se a área de estudo, é mais afetada por alturas maiores de onda, este fato é um potencial causador de erosão.

As figuras 25 e 26 mostram que as correntes longitudinais criadas por ondas, para o clima de ondas médio, ocorrem numa região muito próxima à praia, e possuem uma tendência a recirculação direcionada para o norte.

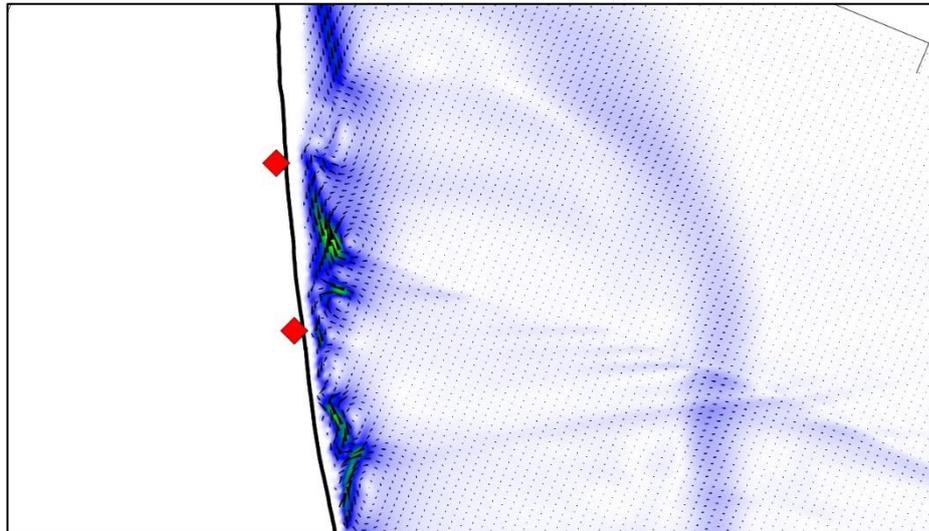
Maiores velocidades de correntes são observadas nas Figuras 27 e 28, que se referem ao clima de ondas de tempestade. Estas correntes possuem sentido predominante para norte, e observa-se que elas ocorrem desde a região sul da praia, próxima ao banco de areia, até a região norte. Este fato aponta que o sedimento encontrado no banco de areia possivelmente pode ser transportado para o norte.

FIGURA 25 - PADRÃO DE CORRENTE (m/s) PARA O ESTADO DE MAR MÉDIO.



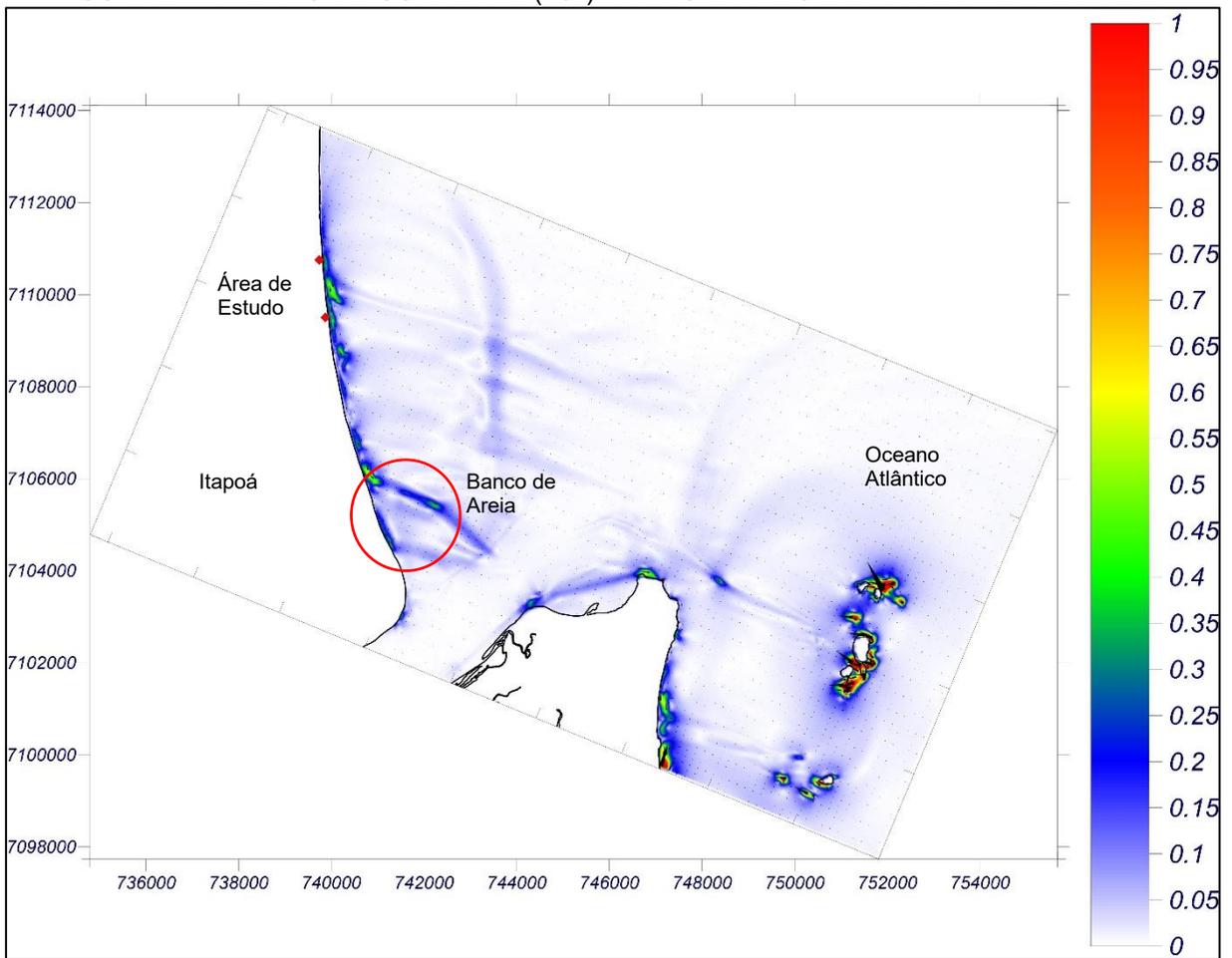
FONTE: A autora.

FIGURA 26 - ZOOM DA ÁREA DE ESTUDO PARA O ESTADO DE MAR MÉDIO



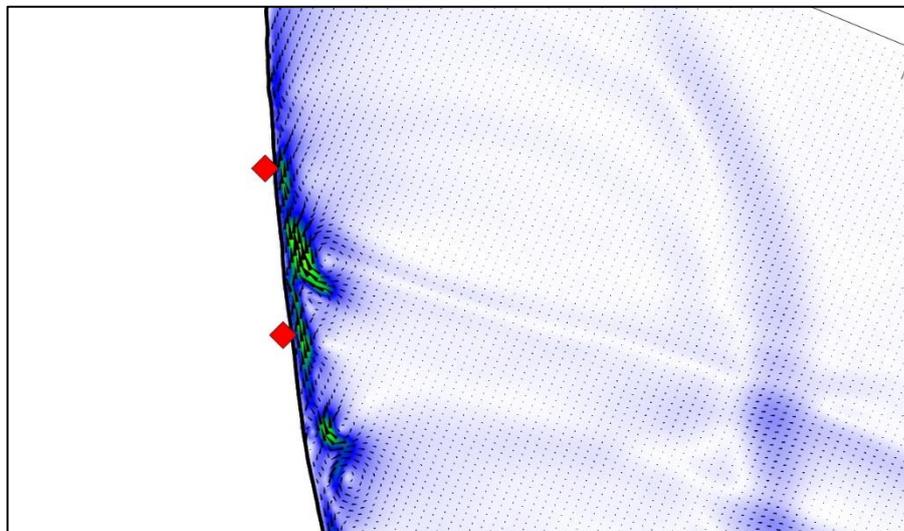
FONTE: A autora.

FIGURA 27 - PADRÃO DE CORRENTE (m/s) PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.



FONTE: A autora.

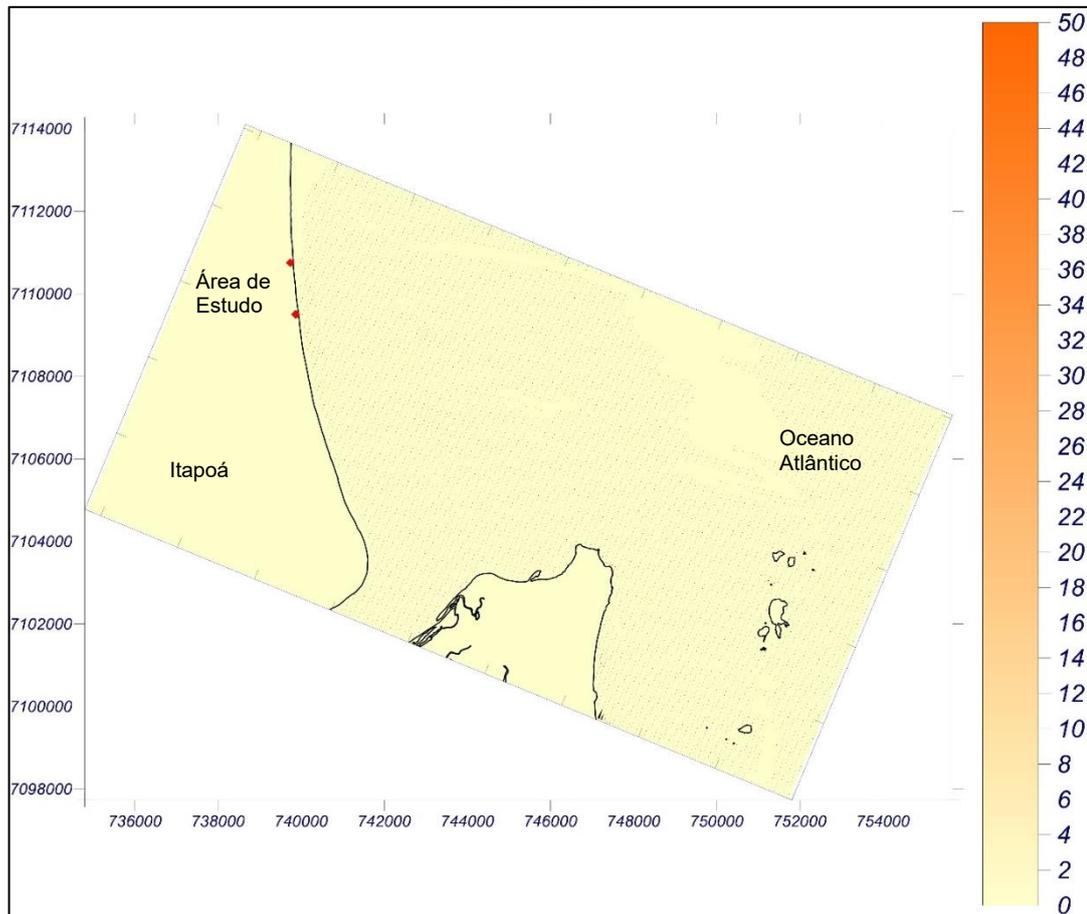
FIGURA 28 - ZOOM DA ÁREA DE ESTUDO PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.



FONTE: A autora.

A FIGURA 30 mostra o padrão de circulação gerado pelas ondas para o clima de ondas médio. Facilmente observa-se que para este clima de ondas a circulação possui pouca relevância para o estudo da erosão costeira na cidade de Itapoá.

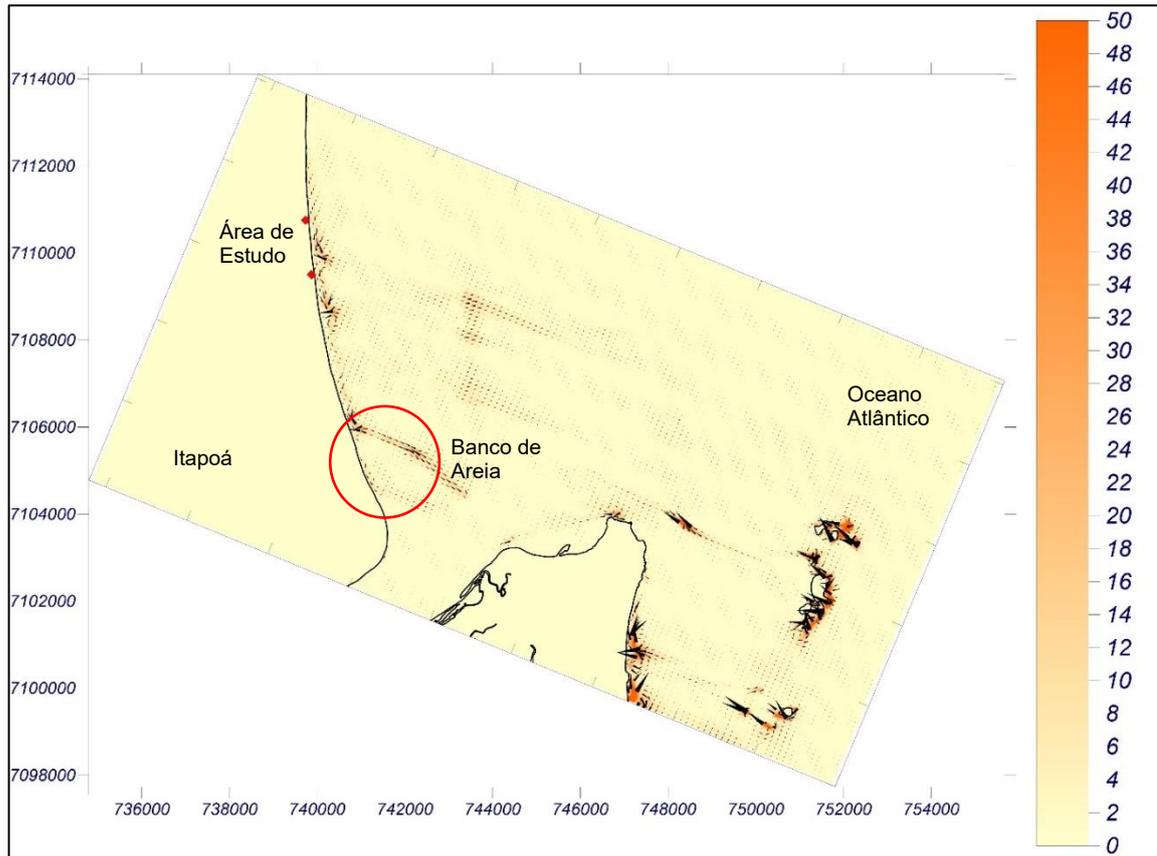
FIGURA 29 – PADRÃO DE CIRCULAÇÃO GERADO PELAS ONDAS ( $m^3/s$ ) PARA O CLIMA DE ONDA MÉDIA.



FONTE: A autora.

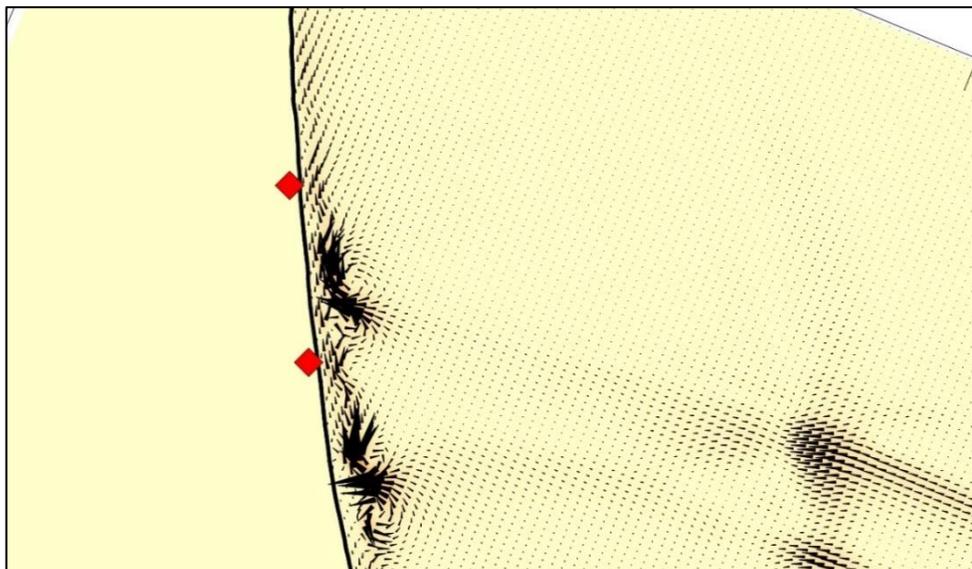
Para o clima de ondas de tempestade, figuras 31 e 32, o padrão de circulação gerado pelas ondas mostra-se mais significativo do que o padrão de circulação para o clima de ondas médio. Próximo a região de estudo se observa um padrão de recirculação, esta ocorre desde a região sul da praia até a região norte, levando possivelmente os sedimentos contidos no banco de areia para o norte. Porém vale salientar que a circulação ocorre de forma oscilatória, ocorre tanto para o norte, quanto para o sul ao longo do ano, porém neste evento em específico observa-se uma maior circulação ocorrendo para norte.

FIGURA 30 PADRÃO DE CIRCULAÇÃO GERADO PELAS ONDAS ( $m^3/s$ ) PARA O CLIMA DE ONDA DE TEMPESTADE.



FONTE: A autora.

FIGURA 31 - - ZOOM DA ÁREA DE ESTUDO PARA O ESTADO DE MAR DE TEMPESTADE.



FONTE: A autora.

### 5.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A média anual do sedimento transportado é a diferença entre o montante total de sedimentos transportados para os dois sentidos (esquerda e direita). A TABELA 3, mostra os resultados das médias de sedimentos transportados durante o decorrer de um ano para as direções Sul (Q+) e Norte (Q-) e o valor médio transportado Q obtido para cada perfil (a localização dos perfis pode ser observada na Figura 32).

TABELA 3 – VOLUME MÉDIO ANUAL DE SEDIMENTOS PARA OS DIFERENTES PERFIS.

Perfil	Q – Valor médio (m <sup>3</sup> /ano)	Q <sup>+</sup> (m <sup>3</sup> /ano)	Q <sup>-</sup> (m <sup>3</sup> /ano)
1	86150,16	141905,64	-55755,48
2	-351278,75	711,21	-351989,96
3	44416,30	127739,74	-83323,44
4	-317600,90	0,40	-317601,29
5	-231543,42	118,19	-231661,61
Média	-153971,32	54095,03	-208066,36

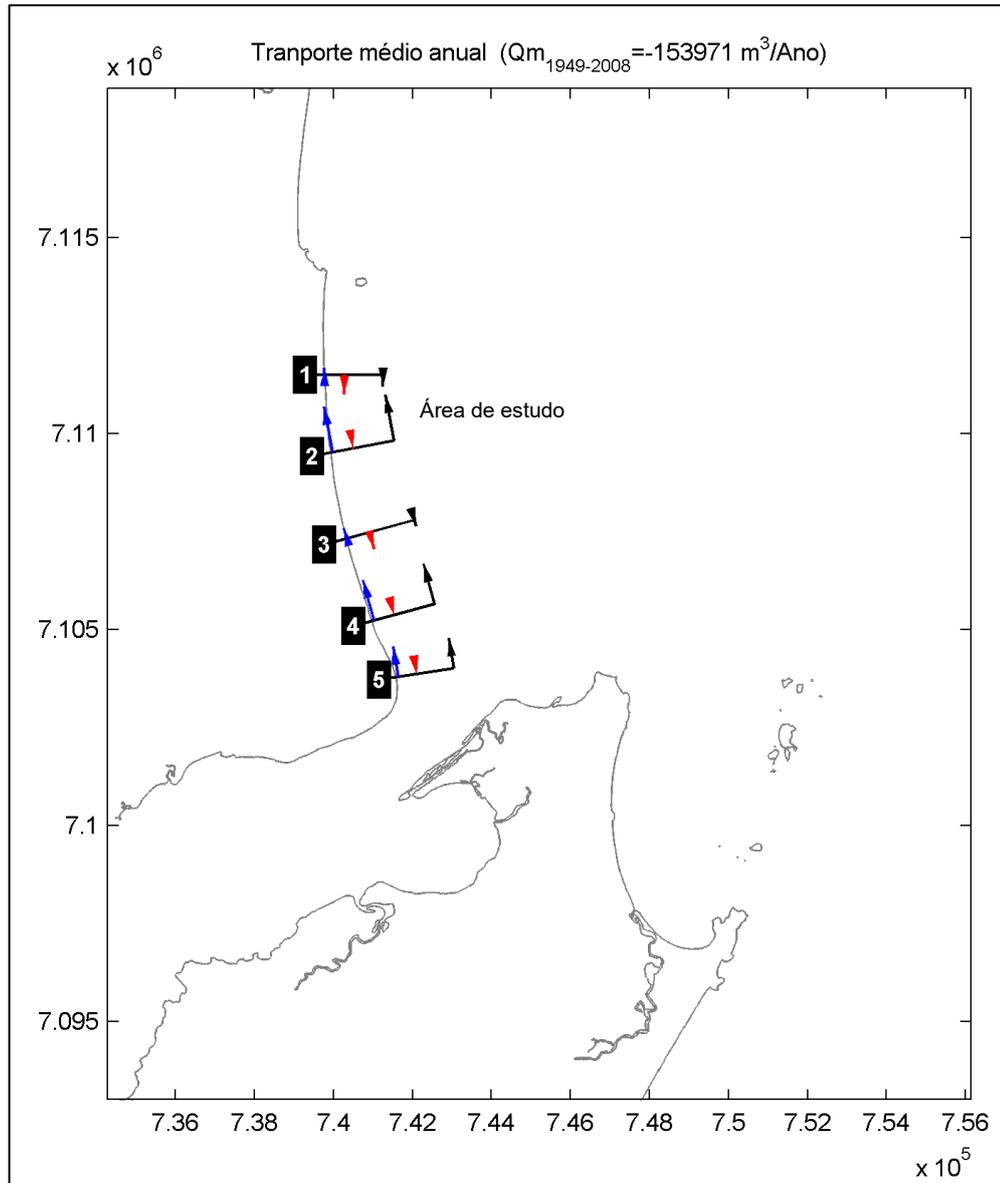
FONTE: A autora.

Comparando os valores mostradas na Tabela 3, observa-se que há uma direção resultante para norte. A Figura 32 mostra o diagrama de transporte médio para cada perfil.

Sendo assim, entende-se que o banco de areia formado na saída da baía, que coincide com os perfis 4 e 5, possui interferência no aporte de sedimentos que migram para a região norte da praia.

Entre os perfis 1 e 2 encontra-se a área de estudo. A maior média anual de sedimentos transportados, que ocorre no perfil 2, mostra que como outras regiões foram também erodidas, o perfil 2 pode estar sendo utilizado como aporte de sedimentos para o balanço sedimentar da região, intensificando assim o processo erosivo.

FIGURA 32 - DIAGRAMA DO TRANSPORTE MÉDIO DE SEDIMENTOS.



FONTE: A autora.

#### 5.4 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Na imagem de satélite dos anos de 2011 e 2021 foram traçadas as linhas entre a interface vegetação-areia, para que a erosão pudesse ser evidenciada, estas linhas encontram-se na FIGURA 33 onde a linha amarela representa o ano de 2011 e a linha verde o ano de 2021. A localização dos pontos utilizados como base para o estudo da erosão encontra-se na FIGURA 3433.

FIGURA 33 - LINHA VETORIZADA DA INTERFACE VEGETAÇÃO AREIA, COM A IMAGEM DE FUNDO DO ANO DE 2021. LINHA AMARELA REPRESENTA O ANO DE 2011 E A LINHA VERDE O ANO DE 2021.



FONTE: Google Earth, 2021.

FIGURA 34 - PONTOS UTILIZADOS NO ESTUDO DA VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA



FONTE: Google Earth, 2021.

Para cada ponto definido, a distância entre as camadas vetorizadas do ano de 2011 e do ano de 2021 foram calculadas e encontram-se na TABELA 4. Valores positivos indicam recuo da linha em 2021 em relação à 2011. Na FIGURA 34 observa-se que as regiões com a menor variação coincidem com a construção de enrocamentos, e as regiões circundantes aos enrocamentos apresentaram um recuo ao longo dos 10 anos, considerando as imagens. É possível verificar um recuo significativo nos pontos 7, 12, 13 18, 23 e 27

TABELA 4 – DIFERENÇA ENTRE AS LINHAS DE COTA QUE REPRESENTAM A INTERFACE VEGETAÇÃO-AREIA.

Ponto	Distância (m)	Ponto	Distância (m)
2	3.2	15	1.93
3	3.37	16	2.67
4	7.63	17	1.14
5	3.95	18	23.55
6	17.26	19	0
7	18.93	20	1.98
8	9.49	21	7.95
9	4.74	22	-1.46
10	4.51	23	28.75
11	6.58	24	-0.71
12	22.39	25	14.12
13	18.18	26	16.08
14	23.6	27	19.55

FIGURA 35 - EROSIÃO PROCEDIDA DE UM ENROCAMENTO ENTRE OS PONTOS 6 E 8 DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: A autora.

. A FIGURA 36 mostra em detalhe a região de estudo onde pode-se observar uma região com intensa erosão precedida de uma região com enrocamentos, realizados como uma medida emergencial para conter a erosão que ocorria na região. Sendo os pontos 22 e 23 os pontos com os maiores valores de avanço e recuo da linha de costa, respectivamente.

FIGURA 36 - EROSÃO CIRCUNDADA POR ENROCAMENTOS ENTRE OS PONTOS 22 E 23 DA ÁREA DE ESTUDO.



Na FIGURA 37 pode-se observar variações na configuração da costa no período entre 1957 e 2022. Verifica-se uma modificação da linha de costa, com recuo, desmatamento e aumento significativo da área urbana, além do desaparecimento de uma pequena laguna costeira, ao Norte, e da embocadura de um pequeno rio ao Sul. Observa-se também que grande parte das edificações foram construídas muito próximas à linha de costa, contribuindo com o processo erosivo da região.

FIGURA 37 - COMPARAÇÃO ENTRE AEROFOTO DATADA DE 1957 E IMAGEM DE SATÉLITE DO GOOGLE EARTH.



FONTE: A autora.

É importante também salientar, como já comentado, que a erosão costeira pode ser resultado da influência antrópica que altera os mecanismos de feedback da natureza. Na região estudada, e levando em consideração os resultados obtidos através do SMC-Brasil, pode-se definir fatores que potencializam a erosão costeira na região. Observa-se que a linha de costa do ano de 1957 era contínua, com um pequeno córrego na porção inferior da imagem. Em 2022 pode-se observar que a linha de costa possui formato irregular e o córrego foi possivelmente aterrado. Como observado na FIGURA 30 e na FIGURA 31, a circulação dificulta a manutenção dos sedimentos no local.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Grande parte da costa brasileira sofre com a erosão, que é um dos principais temas da gestão costeira no país. Na estruturação de projetos voltados à mitigação da erosão da costa, fatores ambientais, fenômenos naturais e aspectos antropogênicos devem ser levados em consideração. No Brasil existem falhas na compreensão do comportamento morfodinâmico de longo e curto prazo das praias, grande parte motivado pelo baixo interesse do poder público na coleta de dados relevantes sobre os elementos envolvidos na dinâmica costeira.

Os resultados das simulações permitiram estabelecer a possível dinâmica dos sedimentos na região estudada e mostrar fatores potenciais de erosão na área de estudo. O uso do SMC-Brasil no estudo da erosão e da movimentação de sedimentos mostrou-se uma alternativa para a gestão costeira, contribuindo com a melhoria da coleta de dados sistemáticos da costa brasileira.

A análise realizada no SMC-Brasil evidenciou que o clima de ondas de tempestade pode influenciar a erosão costeira na praia de Itapoá-SC. Analisando o clima de ondas e correntes foi possível destacar regiões mais instáveis em relação a erosão.

A observação das imagens históricas da cidade de Itapoá mostrou como a urbanização ocorreu de forma desenfreada nos últimos anos. A construção de edificações cada vez mais próximas a linha de costa fizeram com que a prefeitura de Itapoá, criasse uma medida de emergência que contivesse, mesmo que por apenas um intervalo de tempo, a retração da linha de costa. A medida escolhida foi a construção de enrocamentos, observados ao longo da área escolhida para o estudo. Porém, com o passar dos anos, a necessidade de criação destes enrocamentos se torna ainda mais necessária, pois a erosão está cada vez maior.

## REFERÊNCIAS

ANGULO, R. J.; SOUZA, M. C. **Diagnóstico sobre os problemas de erosão costeira no município de Itapoá, litoral Norte do estado de Santa Catarina**. Curitiba: UFPR, 2002. Laudo Técnico.

BIRD, ERIC. **Coastal Geomorphology: An Introduction**. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd., 2008. 2ed.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Panorama da erosão costeira no Brasil** [recurso eletrônico] / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial; Organização Dieter Muehe. - Brasília, DF: MMA, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Manual do Usuário Tools**. Brasília: MMA, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Manual do Usuário 3.0**. Brasília: MMA, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Documento Temático - Ondas**. Brasília: MMA, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Documento Temático - Recuperação de Praias**. Brasília: MMA, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Documento Temático - Mudanças do Clima em Praias**. Brasília: MMA, 2018.

BRASIL. **Portaria nº 01/2019, de 17 de Janeiro de 2019**. Aprova o banco de dados ambientais do município de Itapoá. Prefeitura Municipal de Itapoá, Secretaria de Meio Ambiente. Itapoá, SC, s.n., 2019.

BULHÕES, E. Erosão costeira e soluções para a defesa do litoral. *In* MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. (orgs.) **Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 655-688. ISBN 978-65-992571-0-0.

CARASSAI, J. J. **A deriva litorânea e suas implicações na gênese e orientação de barreiras arenosas pleistocênicas (região de Osório), estado do Rio Grande do Sul, Sul do Brasil**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Setor de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo (RS), 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4682>. Acesso em: 04 abr. 2022.

CROWELL, M.; LEATHERMAN, S.P.; BUCKLEY, M.K. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. **Journal of Coastal Research**, Florida, v. 7, n. 3, p 839-852, 1991.

FARIAS, E. G. G; MAIA, L. P. Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do estado do Ceará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Ingegrada**, Ceará, v. 10, n. 4, pp. 521-544, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/1362>. Acesso em: 15 abr 2022.

DAVIS JR., RICHARD A. **Coastal Sedimentary Environments**. New York : Springer-Verlag, 1978.

FONTES, A. L. **Praias arenosas oceânicas e erosão costeira**, Sergipe, 2010. p 147-166

FREITAS, THAÍS GUIMARÃES DE. **Sedimentologia das Praias Arenosas no Litoral Norete de Santa Catarina e Sul do Paraná**. 2019. 83 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2019.

GOBBI, E. F. **Gerenciamento Costeiro: Análise de casos de litoral do Paraná sob a perspectiva da engenharia costeira**. 1997. 284 f. Dissertação (Doutorado em ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 1997.

HARARI, J. **Noções de oceanografia**. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/itapoa/panorama> . Acesso em: 06 mar. 2022.

MARTINS JUNIOR, L.; MARTINS, R. E. M. W. Evolução socioespacial do município de Itapoá - SC. **Revista Geosul**, Florianópolis. v. 34, n 70, p. 220-238, 2019.

MUEHE, D. Aspectos gerais da erosão costeira no brasil. **Revista de Geografia da UFC**, Rio de Janeiro. Ano 4, n 07, 2005.

MUEHE, D. **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**, Brasília: MMA, 2006.

MUNICÍPIO DE ITAPOÁ. Disponível em: <https://www.itapoa.sc.gov.br/>. Acesso em 17 abr. 2022.

OLIVEIRA, U. R. Relações entre a morfodinâmica e a utilização em trechos da costa oceânica da ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. Florianópolis. 2009. 222 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Setor de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PORPILHO, D. **Análise da sedimentologia, variação da linha de costa e perfil praias de Itapoá-SC, Brasil**. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) - Setor de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar , Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2012.

REVISTA DE GESTÃO COSTEIRA INTEGRADA. Journal of Integrated Coastal Zone Management. [Online] [Citado em: 07 de 04 de 2022.] Acesso em: <https://www.aprh.pt/rgci/glossario/estadomar.html>.

SATO, O. IOF1224 - **Ondas e marés**, Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo - São Paulo (SP), 2010.

SCHIMIDT, A. D.; HORN FILHO, N. O.; ESTEVAM, C. N. **Estratégias adotadas para conter a erosão no litoral de Santa Catarina, Brasil**. In: VII CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2013.

SILVA, A. P. B. DA; SUSKI, C. Análise espaço-temporal da evolução da vulnerabilidade costeira em Itapoá-Santa Catarina: Uma Perspectiva Hidrogeomorfológica e Climática. **Estrabão**, Florianópolis, v. 2, p. 230-233, 2021.

SILVA, G. GI. DA. **Análise morfodinâmica costeira e do transporte sedimentar no município de Itapoá-SC**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba(PR), 2018.

SOUZA, M. C. DE. **Mapeamento da planície costeira e morfologia e dinâmica das praias do município de Itapoá, Estado de Santa Catarina**: Subsídios à ocupação. 1999. 201 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 1999.

SOUZA, M. C.; ANGULO, R. J. Decadal and interannual variations of coastline and beach volumes in Itapoá (Santa Catarina, Brazil). **Journal of Coastal Research**, Florida, v.17, n. 35, p. 202-208, 2003.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. **Revista do departamento de geografia**. São Paulo, n. 17, p. 11-23, 2005.