

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
BACHARELADO EM OCEANOGRAFIA

Luanna Zambelli Azevedo

**O uso de geotecnologias para análise da variabilidade temporal da linha de costa do arco
praial Pântano do Sul - Açores, ilha de Santa Catarina, SC**

Florianópolis

2022

Luanna Zambelli Azevedo

**O uso de geotecnologias para análise da variabilidade temporal da linha de costa do arco
praial Pântano do Sul - Açores, ilha de Santa Catarina, SC**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em
Oceanografia do Centro de Físicas e Matemáticas da
Universidade Federal de Santa Catarina como requisito
para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia
Orientador: Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira

Florianópolis
2022

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

Azevedo, Luanna Z

O uso de geotecnologias para análise da variabilidade temporal da linha de costa do arco praial Pântano do Sul - Açores, ilha de Santa Catarina, SC / Luanna Z Azevedo ; orientador, Pedro de Souza Pereira, 2022.

53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Variação da Linha de Costa. 3. CoastSnap. 4. CoastSat. 5. Erosão Costeira. I. Pereira, Pedro de Souza. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. III. Título.

Luanna Zambelli Azevedo

**O uso de geotecnologias para análise da variabilidade temporal da linha de costa do arco
praial Pântano do Sul - Açores, ilha de Santa Catarina, SC**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em
Oceanografia do Centro de Físicas e Matemáticas da
Universidade Federal de Santa Catarina como requisito
para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de
Bacharel em Oceanografia e aprovado em sua forma final pelo Curso Oceanografia

Floranópolis, 11 de março de 2022

Prof^a. Alessandra Larissa Fonseca, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Pedro de Souza Pereira, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Janete Josina de Abreu, Dra.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Jarbas Bonetti Filho, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que estiveram comigo ao longo desses anos nessa jornada acadêmica, me impulsionando, inspirando e ensinando tanto! Se por acaso esquecer alguém por aqui espero já ter agradecido ao longo desses anos!

Venho agradecendo desde Minas Gerais, de onde vim e onde também um dia já foi mar. Primeiramente gostaria de agradecer meus pais, pelo esforço imensurável em fazer sempre o melhor por mim, há tantos anos estamos na estrada e isso só nos aproximou, eu amo vcs! Aos meus irmãos, Bibi e Mãozi, por serem tão incríveis, engraçados, e duas das pessoas mais inteligentes que eu conheço! Aos meus amigos Liz, Tata, Binho, Kel, agradeço por tantos anos viver e crescer junto de vcs mesmo quando longe, muito do que sou nós somos. Gabi pelas parcerias desde projeto audiovisual e geocientíficos às viagens de caminhão, Lud e Dora agradeço por tantas risadas, inspiração, apoio e acolhimento!

São Luís do Maranhão, ilha do amor, onde tive meu primeiro contato com a oceanografia! Agradeço aos meus tios pela acolhida. Mando um salve pra galera do surf do olho d'água, caolho e travosa! Encontrar vocês direcionou os caminhos para uma vida mais leve e completa ao mesmo tempo. Ao Augusto, Diego, Waguin e Bianca, nosso querido quarteto interestadual no primeiro ano da faculdade! À Carol e Thaís, pela amizade!

Em Floripa, Bia, Zaza, Geó e Renan, agradeço pela dádiva da nossa amizade, bons momentos ainda são! Agradeço de coração à Rafa, por tanta troca, sentimentos e escutas, por me proporcionar trabalhar com crianças em uma escola, e agora com os orgânicos, você foi e é uma peça chave pro desenrolar desses últimos anos! Luiza e Rô pelo carinho, acolhida, e por dividir lindos meses do projeto na escola!

Na oceanografia agradeço primeiramente ao professor Pedro por me acolher no laboratório de oceanografia costeira, por todos os ensinamentos e conselhos, por estar sempre disposto a ajudar e colaborar, pela paciência e por responder a todos os meus porquês hahaha. Agradeço a todos os professores, em especial às professoras Alessandra, Ju Leonel, Marinez e Andrea por abrirem as portas para diálogos ricos e engrandecedores, por sempre me apoiarem e colaborarem com minhas iniciativas, vocês são demais! Aos professores Jarbas e Janete pelo interesse e disponibilidade para contribuição com esse trabalho. À Luana, Ju, Hillary, amigas de sala pra vida! Agradeço ao corpo técnico da UFSC, à secretária Núbia, aos cozinheiros do restaurante universitário, aos da limpeza, vocês são a base disso tudo!

Sou imensamente grata por ter participado dos encontros nacionais de oceanografia e das pessoas que conheci e experiências que vivi, onde a gente se sente mais próximos e fortes, juntos construímos pontes interdisciplinares imensuráveis! Sempre que voltava dos encontros tudo fazia mais sentido e tinha mais valor, principalmente dentro da oceanografia.

Agradeço a companhia dos meus amigos desse Brasil, aos do RS, ES, SP, RJ, MA, PR, BA. E aos de Floripa, meus moços Isis, Yudi, Natasha, Heitor, Joãozinho. Às pessoas que já dividi teto, Bia, Isis, Babi, Malu, Natasha, Ju, Gabriel G8, Yudi, Rebs, Ana e Marília, amo vcs! Aos amigos e família carioca, é sempre de grande energia estar com vcs! Em especial, Lala e Milena, de aventura e paz desde o primeiro encontro, Kaique por todos os cafés e as conversas, João toomany pela parceria e pelas ajudas essenciais em python e GIS, Matheus, agradeço por toda a inspiração e força, pelos nossos momentos e cenas de filme na vida real.

Por fim, agradeço a EPAGRI pelos dados de maré disponíveis, todos os colaboradores do *CoastSnap*, ao Mitch Harley, e também a Comunidade de Desenvolvimento de Código Aberto e Softwares *Open Source*, por disponibilizar as ferramentas e tutoriais para este trabalho.

“De fato, nós, filósofos e ‘espíritos livres’, ante a notícia de que ‘o Velho Deus morreu’ nos sentimos como iluminados por uma nova aurora; nosso coração transborda de gratidão, espanto, pressentimento, expectativa – enfim o horizonte nos aparece novamente livre, embora não esteja limpo, enfim os nossos barcos podem novamente zarpar ao encontro de todo perigo, novamente é permitida toda a ousadia de quem busca o conhecimento, o mar, o nosso mar, está novamente aberto, e provavelmente nunca houve tanto ‘mar aberto.’”

(Nietzsche, 1982)

RESUMO

A linha de costa é uma feição naturalmente móvel, reflexo de diversos processos naturais e antrópicos. O monitoramento da linha de costa é uma atividade primordial para a compreensão acerca dos processos costeiros fornecendo dados básicos que servem de suporte ao planejamento e ao gerenciamento costeiro. Nesse sentido, avanços tecnológicos em instrumentos de pesquisa e métodos de análise possibilitaram uma diversificação acerca do monitoramento costeiro. As variações da linha de costa ocorrem em diversas escalas temporais, em curto, médio e longo termo. As ferramentas *CoastSat* e *CoastSnap* foram utilizadas para a obtenção e análise da variação da linha de costa do arco praial Pântano do Sul - Açores, entre 1986 e 2021. O *CoastSnap*, uma abordagem de ciência cidadã, consiste em um método de mapeamento da linha de costa utilizando fotografias obtidas por visitantes da praia através de seus aparelhos celulares, sendo posteriormente compartilhadas em mídias sociais ou enviadas para endereços eletrônicos. Foi construída uma estrutura para apoio do celular, de baixo custo e fácil instalação, a fim de padronizar o ângulo de tomada das fotos e orientar os usuários-participantes quanto ao compartilhamento das mesmas. Posteriormente, é feita a retificação das imagens e o mapeamento da linha de costa. Já o *CoastSat* é um conjunto de ferramentas habilitado com o recurso *Google Earth Engine* (GEE) para extrair linhas de costa a partir de imagens disponíveis de satélites. Neste trabalho, foram utilizadas imagens do Landsat 5, Landsat 8 e Sentinel-2. Uma vez que as imagens são coletadas em estágios aleatórios do ciclo das marés, foi definido um intervalo de variação de 0,1 m entre o nível médio do nível do mar ao longo do período de estudo para a comparação direta da largura de praia coletada, cálculo de tendência, em diferentes imagens num intervalo semelhante de nível do mar. A máxima variação da linha de costa foi calculada como a diferença entre os limites máximos e mínimos entre as linhas de costa. A maior variação da largura da praia, obtida pelo *CoastSnap* ocorreu entre 14 de fevereiro de 2019 e 03 de março de 2020, foi quantificada na ordem de 50 m, apresentando uma tendência de aumento da largura na ordem de +0,05 m/mês. As linhas de costa extraídas pelo *CoastSat*, para o período entre 10 de janeiro de 2019 e 02 de agosto de 2020, obtiveram uma variação máxima da linha de costa de 75 m, e a tendência da largura da praia de - 0,82 m/mês. Já para o período entre 2013 e 2020 a variação máxima da linha de costa foi de 80 m, enquanto a tendência de variação da largura da praia, de nordeste para sudoeste, atingiu os valores de -4,3 m/ano, -3,96 m/ano, -3,96 m/ano, -2,88 m/ano e -1,44 m/ano. A análise de 35 anos obteve uma variação máxima da linha de costa de 80 m enquanto que a tendência da largura da praia foi de -0,7 m/ano, -0,6 m/ano, -0,4 m/ano, -0,1 m/ano, +0,2 m/ano ao longo do arco praial, indicando uma menor tendência erosional no setor nordeste do arco praial. Os valores encontrados indicam que a escolha de diferentes escalas temporais tem influência direta nos valores das taxas de erosão. As taxas de erosão encontradas entre os períodos analisados mostraram que a magnitude dos valores de tendência identificados se intensifica quanto menor a escala temporal. As ferramentas se mostraram eficientes e promissoras para a análises de variabilidade da linha de costa.

Palavras-chave: Variação da Linha de Costa. CoastSnap. CoastSat. Erosão Costeira

ABSTRACT

The coastline is naturally a mobile feature, reflecting several natural and anthropic processes. Monitoring the coastline is a key activity for understanding coastal processes, providing basic data that support planning and coastal management. In this sense, technological advances in research tools and analysis methods have enabled a diversification of coastal monitoring. Coastline variations occur on several time scales, in the short, medium, and long term. The tools CoastSat and CoastSnap were used to obtain and analyze the variation of the coastline of the beach arc Pântano do Sul - Açores, between 1986 and 2021. CoastSnap, a citizen science approach, consists of a method for mapping the coastline using photographs taken by beach visitors using their cell phones, which are then shared on social media or sent to e-mail addresses. A structure was built to support the cell phone, low cost and easy to install, to standardize the angle at which the photos are taken, and to guide the user-participants in sharing them. Subsequently, the images are rectified and the coastline mapped. CoastSat is a set of tools enabled by the Google Earth Engine (GEE) to extract coastlines from available satellite images. In this work, images from Landsat 5, Landsat 8, and Sentinel-2 were used. Since the images are collected at random stages of the tidal cycle, a 0.1 m range of variation between the mean sea level over the study period was set for direct comparison of the collected beach width, trend calculation, in different images at a similar sea level range. The maximum shoreline variation was calculated as the difference between the maximum and minimum limits between the shorelines. The greatest variation in beach width obtained by CoastSnap occurred between February 14, 2019, and March 03, 2020, was quantified in the order of 50 m, showing a trend of increasing width in the order of +0.05 m/month. The shorelines extracted by CoastSat, for the period between January 10, 2019, and August 02, 2020, obtained a maximum shoreline variation of 75 m, and the trend of beach width of - 0.82 m/month. For the period between 2013 and 2020, the maximum variation of the coastline was 80 m, while the trend of beach width variation, from northeast to southwest, reached the values of -4.3 m/year, -3.96 m/year, -3.96 m/year, -2.88 m/year, and -1.44 m/year. The 35-year analysis obtained a maximum shoreline variation of 80 m while the beach width trend was -0.7 m/yr, -0.6 m/yr, -0.4 m/yr, -0.1 m/yr, +0.2 m/yr along the beach arc, indicating a lower erosional trend in the northeastern sector of the beach arc. The values found indicate that the choice of different time scales has a direct influence on the values of erosion rates. The erosion rates found among the analyzed periods showed that the magnitude of the identified trend values intensifies the smaller the time scale is. The geotechnologies showed to be efficient and promising for shoreline variability analysis.

Keywords: Coastline Variation. CoastSnap. CoastSat. Coastal Erosion

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. As linhas brancas perpendiculares à linha de costa são os transectos utilizados no *CoastSat*. O triângulo vermelho indica a localização da estação do *CoastSnap*. A área de alcance do mapeamento feito pelo *CoastSnap* está compreendida entre os transectos T2 e T3. 17
- Figura 2: Fluxograma da metodologia aplicada ao *CoastSnap* 19
- Figura 3: a) Local de instalação da estação *CoastSnap* em uma passarela de acesso à praia dos Açores, com destaque em vermelho para a estação. b) Imagem próxima ao totem/placa informativa. 20
- Figura 4: À esquerda pontos de controle (pontos verdes), e a direita, imagem retificada e linha de costa digitalizada. 21
- Figura 5: a) Duas imagens da área de estudo, obtidas pelo satélite Sentinel-2. A imagem à esquerda data de 26 de maio de 2020 e a imagem à direita 04 de abril de 2020. b) Saída da classificação da imagem onde cada pixel foi rotulado com uma de três classes: 'areia' em laranja, a praia e o campo de dunas), 'água branca' (em azul claro, a zona de surfe) e 'água' (em azul escuro), também indica a linha de costa mapeada em preto. Em c) Imagem em escala de cinza dos valores de pixels MNDWI. 24
- Figura 6: Número de imagens compartilhadas em diferentes plataformas digitais. 26
- Figura 7: a) Imagem do dia 25 de março de 2019, retificada para coordenadas planas, contendo a linha de costa detectada pelo *CoastSnap* e aquela medida em campo com RTK. b) Histograma da diferença, em metros, calculada entre as medições realizadas *in situ* e remotamente a curva em vermelho indica a curva de distribuição normal dos dados. 27
- Figura 8: Diferentes linhas de costa identificadas sobre a imagem oblíqua de 30 de dezembro de 2019, às 08 h e 49 min. 29
- Figura 9: Distribuição das imagens do *CoastSat* utilizadas na série temporal por nível (círculos vermelhos). Entre as linhas tracejadas vermelhas constam as imagens utilizadas (círculos vermelhos com centro preto) na análise de tendência. 30
- Figura 10: Em a) os dados de marés observadas durante o período de estudo, entre as retas indicadas em vermelho, estão as imagens utilizadas para análise da tendência, nível (m) utilizado foi o da primeira imagem, 0,42m, e o intervalo foi de 0,1 em torno desse nível; b) posição média da linha de costa média entre fevereiro de 2019 e março de 2020; c) altura significativa de onda (ERA5); d) período médio de onda (ERA5) e; e) direção de ondas

- (ERA5). Em vermelho destaca-se a faixa com os maiores e menores valores para a linha de costa. 31
- Figura 11: Análise de variação da largura da praia nos transectos 2 e 3, obtido pelo *CoastSat* no período entre janeiro de 2019 a setembro de 2020. 32
- Figura 12: Imagem da praia com setas vermelhas indicando aspecto da duna frontal características antes (a) e depois (b) do episódio de erosão. Delimitação da duna frontal em diferentes datas. c) Imagem retificada de 14 de março de 2020. d) Imagem retificada de 20 de junho de 2020. 34
- Figura 13: Mapa da área de estudo contendo os 5 transectos e as linhas de costa mapeadas. Das linhas mais escuras para as mais claras representam as mais antigas (2013) para as mais recentes (2019). 36
- Figura 14: Distribuição das imagens do *CoastSat* utilizadas na série temporal por nível (círculos vermelhos). Entre as linhas tracejadas vermelhas constam as imagens utilizadas (círculos vermelhos com centro preto) na análise de tendência. 37
- Figura 15: Análise de variação da linha de costa nos 5 transectos no arco praiial Pântano do sul-Açores, obtido pelo *CoastSat* no período entre 2013 a 2020. 38
- Figura 16: Mapa da área de estudo contendo os 5 transectos definidos e as 98 linhas de costa mapeadas. As linhas com coloração mais escuras representam as mais antigas (1985) e as com coloração mais claras as mais recentes (2021). 39
- Figura 17: Série temporal da variação da linha de costa ao longo dos 5 transectos entre 1986 e 2020. 40
- Figura 18: Diferentes estágios morfodinâmicos e feições morfológicas apresentadas nas imagens acima. a) Banco e cava transversal; b) Banco e praia rítmica, apresentam dois bancos e uma cava longitudinal; c) Banco e cava transversal; d) e) f) banco e cava transversal; f) Banco e praia rítmica, cavas transversais e longitudinais; g) i) Praia dissipativa, ampla zona de surfe, quebra de ondas paralelas a costa; h) Banco e cava transversal, cúspides praiais. 42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Imagens de satélites disponíveis no GEE que podem ser utilizadas no *CoastSat*.
(Modificado de Vos *et. al.* 2019)

23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição, quantidade e fonte das imagens utilizadas, por período, nos mapeamentos. 28

Tabela 2: Valores de tendência da largura da praia em cada transecto nas diferentes escalas temporais 41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPAGRI/CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina

GEE -*Google Earth Engine*

GNSS - *Global Navigation Satellite System* - Sistema Global de Navegação por Satélite

GPS- *Global Position System* - Sistema de Posicionamento Global

MNDWI - *Modified Normalized Difference Water Index* - Índice de Água Diferença Normalizada Modificado

RGB - *Red, Green and Blue* - Vermelho, verde e azul

RMSE - *Root Mean Square Error* - Erro Médio Quadrático

RTK - *Real Time Kinematics* - GPS Cinemático em Tempo Real

$\tan\beta$ - Medida de inclinação da face praial

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
OBJETIVOS	14
2.1 Geral	14
2.2 Específicos	14
METODOLOGIA	15
3.1 Área de estudo	15
3.2 Ferramentas de estudo da linha de costa	17
3.2.1 Ferramenta CoastSnap	18
3.2.2 Ferramenta CoastSat	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Participação pública na coleta das imagens do CoastSnap	25
4.2. Relação entre métodos de mapeamentos da linha de costa: in situ (RTK) e remoto (CoastSnap)	26
4.3. Variabilidade e tendência da linha de costa em diferentes escalas espaço-temporais	27
4.3.1 Escala temporal curto termo: 2019 - 2020	28
4.3.2 Escala temporal médio termo: 2013 - 2020	35
4.3.3 Escala temporal médio termo: 1985 - 2020	39
4.4. Análise qualitativa das características morfodinâmicas através de observações de oportunidade (CoastSnap)	41
5. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

A linha de costa é a interface entre o ambiente terra-mar, uma feição naturalmente móvel, reflexo de diversos processos naturais e antrópicos. A ocupação humana, as ondas, as marés, os agentes climáticos e as variações do nível do mar (a curto e a longo prazo) são os principais agentes modeladores da linha de costa, e causam variações substanciais no ambiente praial (LUIJENDIJK *et al.*, 2018; MENTASCHI *et al.*, 2018). As variações da linha de costa vêm sendo objeto de estudo de muitos pesquisadores ao redor do mundo, como Bruun (1962); Bird (1985); Mentaschi *et al.* (2018) e Luijendijk *et al.* (2018), e em nível nacional, Souza & Suguio (2003), Dillenburg & Mazzer (2009) e Muehe (2018) são autores contribuintes para o panorama de análise da linha de costa, possibilitando melhor compreensão acerca dos processos de retrogradação e progradação a que esta está sujeita.

O monitoramento da linha de costa é uma atividade primordial para a compreensão acerca dos processos costeiros, por exemplo, a erosão, fornecendo dados básicos que servem de suporte ao planejamento e ao gerenciamento (SIMPSON *et al.*, 2012; NICHOLLS *et al.*, 2014). Mesmo com décadas de pesquisa, a resposta imediata de uma praia ao impacto das ondas e eventos climáticos ainda é difícil de prever (COCO, 2015). Nesse sentido, avanços tecnológicos em instrumentos de pesquisa e métodos de análise possibilitaram uma diversificação no monitoramento da linha de costa (HOLMAN & STANLEY, 2005; SPLINTER *et al.*, 2018, ALMEIDA *et al.*, 2021).

O aumento do nível médio do mar e da frequência e intensidade de ocorrência de eventos climáticos e altura de onda, associados aos processos erosivos e de recuo temporário da linha de costa, são fatores que potencializam a vulnerabilidade costeira (REGUERO *et al.*, 2019). As variações das condições climáticas e oceanográficas regionais ditam diferentes processos morfodinâmicos, e, como consequência dessa variabilidade, a vulnerabilidade à erosão e à inundação costeira encontram-se à mercê destes processos de interação oceano-atmosfera (AUDÈRE & ROBIN, 2021). Embora eventos climáticos determinem o comportamento da praia a curto, médio e longo termo, intervenções humanas nos processos costeiros acompanhadas de urbanização da orla são consideradas como as principais causas de erosão costeira (MUEHE, 2018; LUIJENDIJK *et al.*, 2018).

Na ilha de Santa Catarina, o arco praial Pântano do Sul representa uma praia de enseada exposta às ondulações de E - S-SE, o alto grau de exposição às ondas se dá principalmente no setor central do arco na praia dos Açores, onde apresenta urbanização estabelecida no pós-praia (OLIVEIRA, 2004). De acordo com Klein *et al.* (2006) e Horn Filho (2006) esta praia exhibe evidências de processos erosivos atuais, e, foi classificada como em equilíbrio dinâmico. Estes processos são corroborados pela própria orientação e forma da praia, sujeita a distintos graus de exposição às ondulações. Estudos anteriores indicaram que o arco praial Pântano do Sul-Açores apresenta tendências erosivas (HORN, 2006; OLIVEIRA, 2004; KLEIN *et al.*, 2003; GRE *et al.*, 1997) tanto em escala interanual quanto interdecadal (MAZZER e DILLENBURG, 2009). A diminuição da largura da praia pode ser explicada tanto por sua forma em planta (KLEIN *et al.*, 2006) quanto em função da ocupação do setor de duna frontal e pós-praia (NEVES, 2017).

Análises em escala temporal de longo termo (décadas a séculos) e de médio termo (anos à décadas) são relevantes dentro do contexto histórico evolutivo da região, enquanto que a escala temporal de curto termo (horas a anos), permite avaliar a amplitude da extensão costeira retrabalhada em curto período (STIVE *et al.*, 2002). Nesse sentido, este trabalho busca investigar a variabilidade da linha de costa do arco praial Pântano do Sul, em diferentes escalas espaço temporais, utilizando geotecnologias como o *CoastSnap*, incluindo a participação comunitária através de abordagens de ciência cidadã, e o *CoastSat*, ferramenta remota, de código aberto, como instrumento de monitoramento, planejamento e gerenciamento costeiro, contribuindo com a continuidade dos estudos na praia em questão.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar a variabilidade da linha de costa do arco praial Pântano do Sul, ilha de Santa Catarina, (SC), em diferentes escalas espaço-temporais.

2.2 Específicos

- Utilizar dos resultados da ciência cidadã na obtenção dos dados para análise da linha de costa e das características morfodinâmicas da praia;
- Analisar o comportamento da linha de costa em escala temporal de 2019 a 2020, realizada pelo *CoastSnap* no balneário dos Açores e pelo *CoastSat* ao longo do arco praial;

- Analisar o comportamento da linha de costa ao longo do arco praial em escala temporal de 1985 a 2021, realizada pelo *CoastSat*;
- Identificar as variabilidades máximas da linha de costa e a tendência da largura da praia ao longo do arco praial.

3. METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O arco praial Pântano do Sul - Açores é localizado na costa Sudeste da ilha de Santa Catarina, entre os paralelos $27^{\circ}47'00''S$ e $27^{\circ}47'26.5''S$ e os meridianos $48^{\circ}30'24''W$ e $48^{\circ}31'51.7''W$, medindo aproximadamente 3,9 km de comprimento (OLIVEIRA, 2004). O arco praial possui forma parabólica onde as praias são configuradas como praias de enseada (MAZZER, 2004), com orientação predominante de nordeste-sudoeste, sendo delimitada a nordeste pelo promontório rochoso da ponta do Marisco e a sudoeste pelo rio (e ponta) das Pacas. Na porção central do arco praial encontra-se a praia dos Açores (Figura. 1).

A planície costeira adjacente ao arco praial tem sua formação relativa à dinâmica e aos processos costeiros, sendo constituída pelo sistema deposicional transicional constituído pelos depósitos eólico, marinho praial e fluvio-lagunar de idade holocênica e depósito de leque aluvial do sistema deposicional continental, do Quaternário indiferenciado. No trecho Central do arco praial Pântano do Sul - Açores, a planície costeira é caracterizada do ponto de vista geomorfológico por cordões litorâneos com dunas transgressivas (HORN FILHO, 2017).

As características meteorológicas do sul do Brasil são controladas principalmente pela atuação das massas de ar Polar e Tropical marinha do oceano Atlântico Sul. Embora haja um predomínio de um sistema fixo de alta pressão, periodicamente esse sistema é perturbado pela passagem de frentes frias associadas aos ciclones extratropicais e aos anticiclones oriundos da zona polar (MARIOTTI e FRANCO, 2001; OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Estes eventos meteorológicos são geralmente acompanhados de fortes tempestades vindas de sul e sudeste, principalmente durante os meses de outono e inverno. Ao longo do ano, a direção dos ventos predominantes é do quadrante norte, com intensidade de até 4 m/s, enquanto que os ventos advindos do sul têm maiores valores de intensidade, em torno de 6 à 8 m/s. Já os ventos de direção leste e oeste apresentam intensidade de aproximadamente 2 m/s (TRUCOLLO, 1998).

As ondulações predominantes durante o outono e inverno são oriundas do quadrante sul, com período entre 10,6 s e 12 s, enquanto as vagas de leste, com período de aproximadamente 8 s, prevalecem na primavera. Ademais, a média da altura típica de onda é menor durante o verão em relação às demais estações do ano, quando podem chegar a ultrapassar 4m de altura (ARAÚJO *et al.*, 2003). O ângulo de incidência das ondas atinge o arco praial em diferentes intensidades a depender da direção do trem de ondas. Devido a presença da ponta do Marisco, limite nordeste do arco praial, e do arquipélago das três irmãs, situado a sul em relação a linha de costa, a porção nordeste do arco praial é parcialmente protegida a ação das ondas de leste e sudeste.

O regime das marés atuantes na ilha de Santa Catarina é do tipo micro maré, mista, semi-diurna, apresentando dois ciclos desiguais de maré por dia, cuja amplitude máxima astronômica é de, aproximadamente, 1,4 m. Já a maré meteorológica, definida por Pugh (1987) como sendo o resultado da diferença entre a maré astronômica e a maré observada, é responsável pela ocorrência das maiores variações do nível do mar na região, podendo provocar uma elevação de até 1m acima da maré astronômica (TRUCOLLO, 1998; OLIVEIRA, 2004).

A praia do Pântano do sul e dos Açores são destinos turísticos e apresentam tanto áreas preservadas quanto áreas urbanizadas, que por sua vez, estão sujeitas às variações da linha de costa e aos problemas provenientes da erosão. O setor nordeste do arco praial apresenta ocupação estabelecida no pós praia (balneário Pântano do Sul), o limite dessa ocupação ocorre na presença do campo de dunas estabelecidas entre o transecto 5 e 4. O balneário dos Açores está localizado na porção sudoeste-central do arco praial, entre a estação do *CoastSnap* e o transecto 1 (Figura 1).

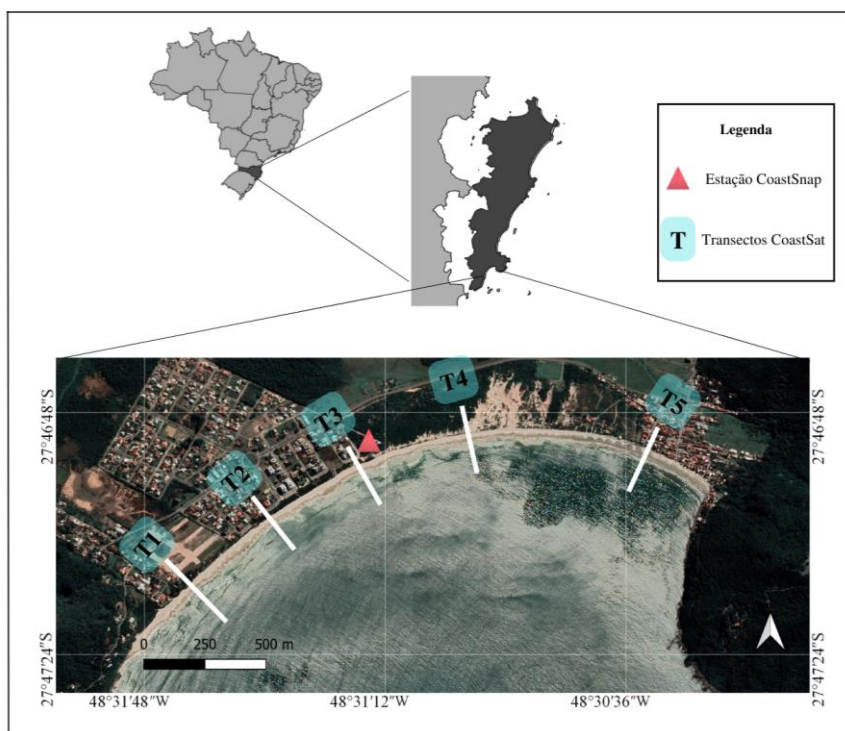


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. As linhas brancas perpendiculares à linha de costa são os transectos utilizados no *CoastSat*. O triângulo vermelho indica a localização da estação do *CoastSnap*. A área de alcance do mapeamento feito pelo *CoastSnap* está compreendida entre os transectos T2 e T3.

A ocupação urbana nesta localidade, apesar de bem próxima à praia, respeita o plano diretor, preservando, em partes, as dunas frontais (NEVES *et al.*, 2017). No entanto, a ocupação humana sobre as dunas frontais no balneário Pântano do Sul e nos Açores, assim como modificações na drenagem local e na vegetação original, associam-se aos problemas históricos de erosão costeira já constatados há mais de dez anos (GRE *et al.*, 1997; MAZZER & DILLENBURG, 2009).

3.2 Ferramentas de estudo da linha de costa

Diversas ferramentas têm sido utilizadas para observação e monitoramento da posição do perfil praiar e da linha de costa, desde medições *in situ* a técnicas de sensoriamento remoto. Métodos como: Balizas de Emery (EMERY, 1961), perfil medido com nível e régua (BIRKEMEIER, 1985), fotografias aéreas (ARAÚJO *et al.*, 2009), vídeo imageamento (TURNER *et al.*, 2004; PIANCA *et al.*, 2015), análise espacial geodésica utilizando o Sistema de Posicionamento Global (GPS-GNSS) (SILVA *et al.*, 2013), além do recente uso de aeronaves de pequeno porte não tripuladas e do sensoriamento remoto via satélite (SPLINTER

et al., 2018). Ademais, o advento das tecnologias digitais e organização da sociedade em rede, permite novos caminhos para o monitoramento da costa envolvendo a participação da sociedade no processo de aquisição de dados, sendo conhecido como ciência cidadã (ALBAGLI, 2015).

Visando explorar a variação da linha de costa sob diferentes perspectivas temporais, o *CoastSnap* (HARLEY *et al.*, 2019) será utilizado na análise do comportamento da linha de costa (variabilidade e tendência), entre 2019 e 2020, enquanto o *CoastSat* (VOS *et al.*, 2019) será aplicado com a finalidade de avaliar a variabilidade e a tendência da linha de costa entre 1986 e 2021.

Para o cálculo da variabilidade da linha de costa foi utilizada a variação máxima encontrada em cada série temporal, ou seja, a diferença entre o maior e menor alcance da linha de costa, incluindo os dados encontrados nos diferentes valores de nível. O cálculo da tendência da linha de costa é calculado através de regressão linear entre as posições da linha de costa ao longo de cada série temporal, dentro dos intervalos de nível estabelecidos.

3.2.1 Ferramenta *CoastSnap*

O *CoastSnap* é uma ferramenta de monitoramento costeiro comunitário, desenvolvida por pesquisadores da Universidade de New South Wales, Austrália (HARLEY *et al.*, 2019). Escrito em Matlab, os códigos abertos das rotinas do *CoastSnap* já estão sendo reescritos para a linguagem *Python*. Esse método de análise está se disseminando rapidamente ao redor do mundo com novas estações surgindo em diferentes países, tais como Equador, Índia, Espanha, Portugal, Estados Unidos, Jamaica entre outros, além de sua franca expansão pelo Brasil.

O *CoastSnap* consiste em um método de mapeamento da linha de costa utilizando fotografias obtidas por visitantes, frequentadores e moradores da praia através de seus *smartphones*, sendo posteriormente compartilhadas em suas mídias sociais ou enviadas para endereços eletrônicos indicados. Em cada estação de observação é construída uma estrutura para apoio do celular (totem), de baixo custo e fácil instalação, a fim de padronizar o ângulo de tomada das fotos e orientar os usuários-participantes quanto ao compartilhamento das mesmas.

A metodologia aplicada a essa ferramenta consiste basicamente em 8 etapas indicadas a seguir e sintetizadas na figura 2:

- I. Escolha da praia e ângulo de visão;
- II. Instalação da estação *CoastSnap*;

- III. Recebimento das imagens compartilhadas;
- IV. Coleta de pontos de controle em campo;
- V. Elaboração do banco de dados;
- VI. Descarga e registro das imagens no banco de dados;
- VII. Georretificação das imagens;
- VIII. Detecção da linha de costa e correção de maré;
- IX. Análise temporal da linha de costa.

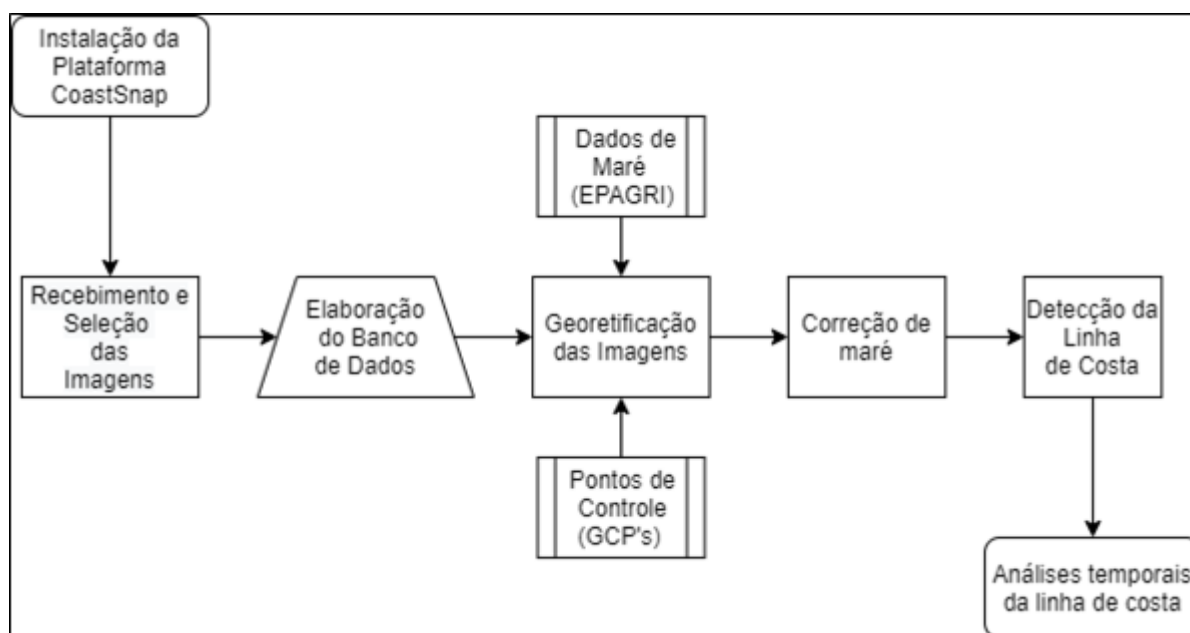


Figura 2: Fluxograma da metodologia aplicada ao *Coastsnap*.

O local escolhido para a instalação da estrutura deve ser propício para a aquisição das imagens, prioritariamente em local com acesso direto à praia, com um grande trânsito de banhistas e frequentadores, bem como em posição privilegiada acima do nível médio local do mar. Essas características são fundamentais para melhor aproveitamento das imagens recebidas, uma vez que contribuem para a constância de envios de imagens e ampliação da extensão de praia a ser analisada.

Na praia dos Açores, a instalação do totem de suporte para o celular e da placa informativa de apoio, onde constam as instruções de participação, contatos e endereços eletrônicos, foi realizada no dia 14 de fevereiro de 2019 em uma passarela de acesso a praia (Figura 3).



Figura 3: a) Local de instalação da estação *CoastSnap* em uma passarela de acesso à praia dos Açores, com destaque em vermelho para a estação. b) Imagem próxima ao totem/placa informativa.

Utilizando um GNSS RTK da marca *Trimble®*, modelo R6, foram coletadas as coordenadas geográficas do suporte de apoio do celular e de pontos de controle pré-definidos espalhados pela praia. Concomitantemente ao registro fotográfico obtido durante a instalação da estação do *CoastSnap* da praia dos Açores, foi mapeada a linha de costa daquele instante com uso do RTK, possibilitando posteriormente, a comparação entre a linha de costa adquirida pelo RTK e aquela obtida através da aplicação de rotinas computacionais de processamento de imagem (HARLEY *et al.*, 2019).

A cada nova imagem compartilhada pela comunidade, a imagem é primeiramente cadastrada no banco de dados, sendo posteriormente retificada para as coordenadas planas, identificando manualmente os pontos de controle localizados no campo de visão da imagem (Figura 4). A retificação da imagem descreve a transformação do plano da imagem em

coordenadas de pixel (U, V) para coordenadas do mundo real (x, y, z), utilizando parâmetros intrínsecos e extrínsecos à câmera. A partir da imagem retificada, as posições horizontais da linha de costa (x_{lc} , y_{lc}) são, em seguida, mapeadas usando uma técnica de detecção de linha de costa.

A detecção da linha de costa é definida nas imagens como a intersecção entre os pixels "úmidos", que representam a superfície do oceano, e os pixels "secos" que indicam os sedimentos da praia por divergências nos canais de cores vermelho, verde e azul (sigla RGB na língua inglesa) (BOAK & TURNER, 2005; HARLEY *et al.*, 2019).

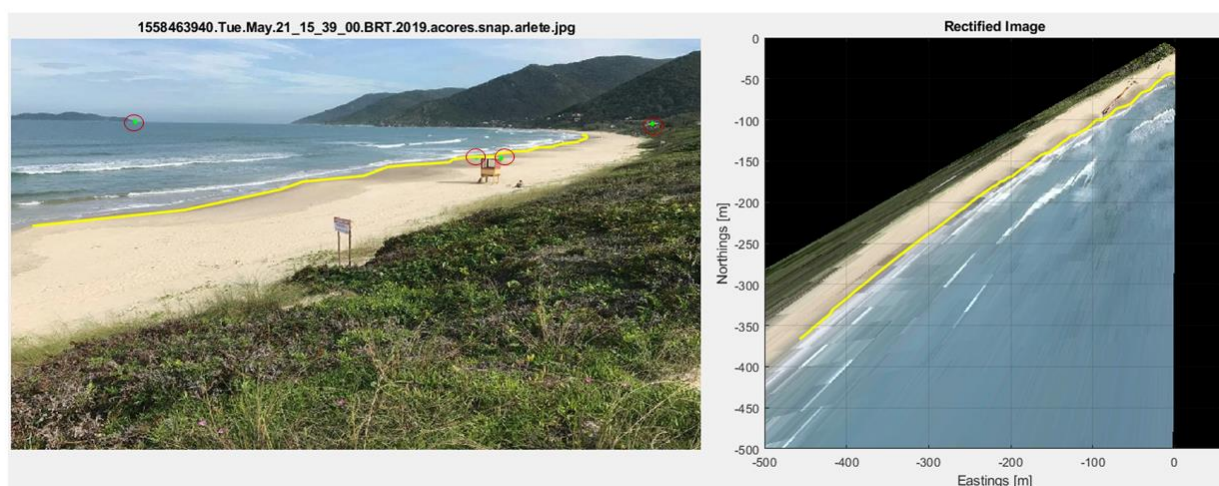


Figura 4: À esquerda pontos de controle (pontos verdes), e a direita, imagem retificada e linha de costa digitalizada.

Semelhante às abordagens do mapeamento da linha de costa utilizando imagens estabelecidas no trabalho de Harley e co-autores (2019), a elevação da linha de costa mapeada é considerada constante ao longo da costa dada pelo dado de nível do marégrafo da EPAGRI do momento em que a imagem foi capturada, e pelo deslocamento vertical (constante) que leva em consideração a inclinação da praia (considerado como sendo 0.06 calculado através dos perfis praias transversais a linha de costa feitos em campo, adquiridos por RTK) e a configuração característica das ondas para o *runup* (altura e período típico de onda, obtidos através do trabalho de Oliveira *et al.*, 2019), gerando assim a linha de costa corrigida.

A largura da praia é definida por transectos transversais a linha de costa, como a distância de um ponto de referência fixo em terra até o limite da linha de costa (x_{lc} , y_{lc}). o cálculo da tendência da largura da praia é feito por uma média das linhas de costa mapeadas, interceptadas por 38 transectos, espaçados por 4,5 m entre si, no balneário dos Açores, setor central do arco praial. A área de alcance do mapeamento feito pelo CoastSnap está compreendida entre os transectos T2 e T3 (Figura 1).

Uma vez que as imagens são coletadas em estágios aleatórios do ciclo das marés, se faz necessário definir um intervalo entre o nível médio do nível do mar ao longo do período de estudo. Neste estudo foi utilizada uma variação de 0,1 m, para mais ou para menos, a partir da primeira imagem coletada, quando o nível foi de 0,42 m, para a comparação direta da largura de praia coletada (cálculo de tendência) em diferentes imagens num intervalo semelhante de nível do mar.

Durante o período de coleta das imagens, alguns pontos de controle utilizados na retificação das imagens foram removidos da praia, contudo, novos pontos de controle virtuais foram adicionados, assegurando a continuação da retificação das imagens com êxito. A estação *CoastSnap_Açores* esteve em operação entre fevereiro de 2019 a abril de 2020, quando então, um evento erosivo danificou parte da passarela de acesso à praia onde se encontrava o totem.

3.2.2 Ferramenta *CoastSat*

O *CoastSat* (VOS *et al.*, 2019) é um conjunto de ferramentas de código aberto escrito na linguagem computacional *Python*, habilitado com o recurso *Google Earth Engine* (GEE) para extrair linhas de costa a partir de imagens disponíveis de satélites. Esse conjunto de ferramentas explora os recursos do GEE para acessar com eficiência as imagens das missões Landsat 5, 7 e 8 (L5, L7, L8) e Sentinel-2 (S2). Neste trabalho, foram utilizadas imagens do L5, L8 e S2. As missões do L7 apresentam lacunas nas imagens na área de interesse, impossibilitando assim o mapeamento da linha de costa por este satélite específico.

O pacote GEE do *Python* é usado para acessar as imagens de satélite, enquanto outros pacotes de aprendizado de máquina (da língua inglesa *machine learning*) e processamento de imagem são empregados para extrair automaticamente a posição da linha de costa.

A área de interesse foi definida em forma de polígono utilizando coordenadas geográficas. Em seguida, o intervalo de tempo entre as imagens e os satélites de interesse foram definidos. Vale ressaltar que, para fins de minimizar o tamanho dos arquivos, apenas as bandas espectrais necessárias para a detecção da linha de costa, (R, G, B, infravermelho próximo - NIR - e a banda de infravermelho de ondas curtas - SWIR1-) estão incluídas na imagem descarregada (Quadro 1).

Quadro 1: Imagens de satélites disponíveis no GEE que podem ser utilizadas no *CoastSat* (modificado de Vos *et al.*, 2019).

Satélite	Cobertura Temporal	Período de Reversão	Resolução em Pixel
Landsat 5	1984 - 2013	16 dias	30 m R, G, B, NIR e SWIR1
Landsat 7	1999 - presente	16 dias	30 m R, G, B, NIR e SWIR1 15 m banda pancromática
Landsat 8	2013 - presente	16 dias	30 m R, G, B, NIR e SWIR1 15 m banda pancromática
Sentinel-2	2015 - presente	5 dias	10 m R, G, B e NIR 20 m SWIR1

Parâmetros gerais foram definidos para maximizar a qualidade dos dados extraídos, tais como o código do sistema de referência espacial (EPSG), o limite máximo na cobertura de nuvens (%) e o controle de qualidade que visa a validação, pelo usuário, de cada detecção de linha de costa, aceitando ou rejeitando a linha de costa mapeada, sendo possível fazer ajustes se necessário. Antes de aplicar o algoritmo de detecção da linha de costa, as imagens são pré-processadas para remover os píxeis “turvos” e melhorar a resolução espacial por meio da interpolação bilinear, chegando a uma resolução de subpixel com precisão horizontal de aproximadamente 15 m (5 m para imagens do S2 e 15 m para imagens do Landsat) (Vos *et al.*, 2019).

A linha de costa é definida neste estudo como sendo a interface instantânea entre a água e a areia, capturada no momento da aquisição da imagem pelo satélite. Em uma imagem sem nuvens, foi feita a digitalização manual de uma linha de costa de referência, de modo a minimizar possíveis erros nas detecções automáticas feitas pela ferramenta. O algoritmo utilizado pelo *CoastSat* para a detecção é dividido em duas etapas: i. classificação da imagem em três classes (areia, água, e água branca); ii. resolução em subpixel da delimitação da fronteira água/areia (Figura 5). Na segunda etapa da detecção da linha de costa, a interface

entre a areia e a água é extraída utilizando o Índice *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), calculado por: $MNDWI = SWIR1 - G$ $SWIR1 + G$, onde SWIR1 e G são, respectivamente, a intensidade de pixel na banda infravermelha de onda curta e na banda verde. Os valores MNDWI variam entre -1 e 1 (Figura 5c).

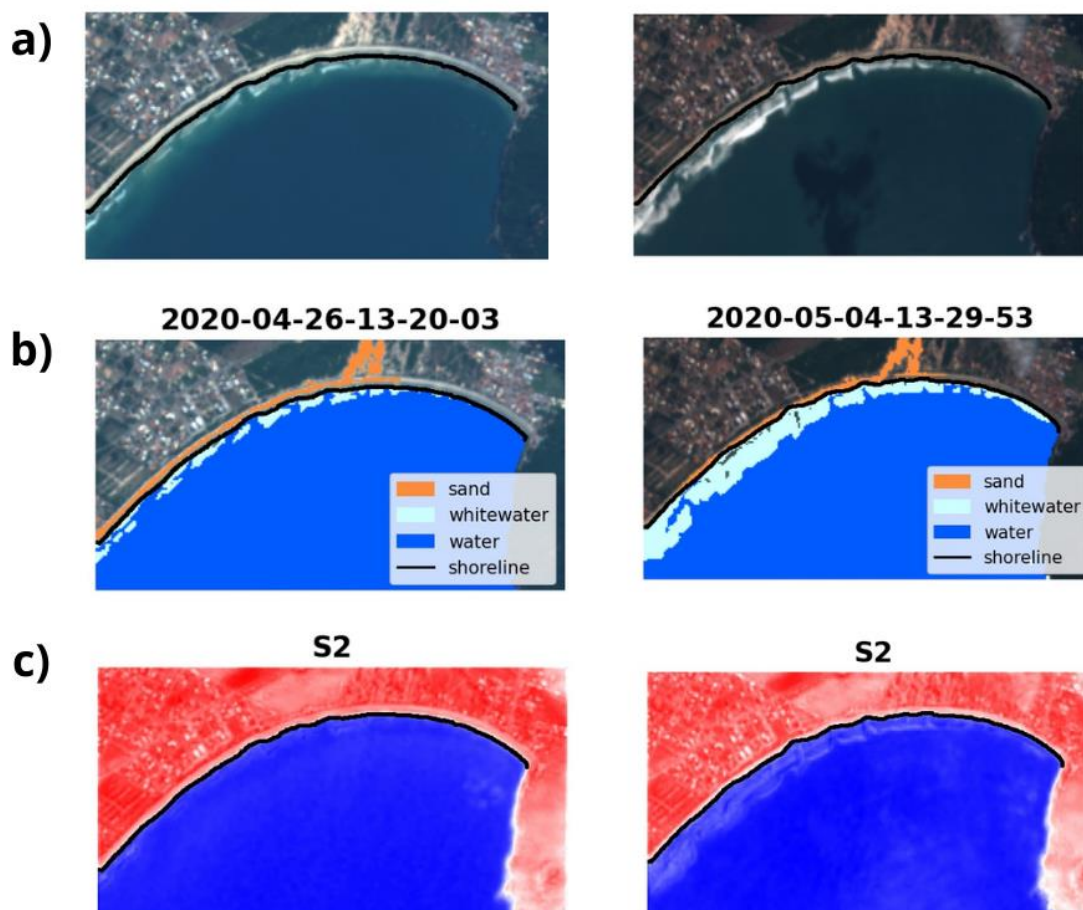


Figura 5: a) Duas imagens da área de estudo, obtidas pelo satélite Sentinel-2. A imagem à esquerda data de 26 de maio de 2020 e a imagem à direita 04 de abril de 2020. b) Saída da classificação da imagem onde cada pixel foi rotulado com uma de três classes: 'areia' em laranja, a praia e o campo de dunas), 'água branca' (em azul claro, a zona de surfe) e 'água' (em azul escuro), também indica a linha de costa mapeada em preto. Em c) Imagem em escala de cinza dos valores de pixels MNDWI.

Para obter a série temporal da mudança da linha de costa, foram digitalizados manualmente 5 transectos perpendiculares à linha de costa. Cada transecto foi definido por dois pontos, o ponto inicial tem origem em terra e o ponto final define o tamanho e a orientação da reta, localizado no mar (Figura 1). Utilizando esses cinco transectos, é feita a intersecção entre as linhas de costa em cada transecto. Foi aplicada uma correção linear de nível utilizando a elevação de referência (considerado 0,55 m como sendo nível médio do mar registrado pelo marégrafo entre 2013 a 2021), a inclinação da face de praia ($\tan\beta = 0,06$) e dados de nível

(derivados do marégrafo da EPAGRI), no momento de aquisição da imagem, referente a cada linha de costa.

Com a finalidade de minimizar a problemática associada à ocorrência de feições rítmicas, como por exemplo as cúspides praias, e também o efeito da variação instantânea e local do nível da água, devido a ação das ondas (*runup*), a posição da linha de costa foi calculada como uma média dos valores encontrados num raio de 25 m em volta do ponto de intersecção entre a linha de costa e o transecto.

As análises de tendência da variação da linha de costa entre 2013 a 2021 foram feitas considerando somente as imagens que estavam dentro do intervalo médio do nível do mar. Visto que o nível médio do mar nesta série temporal é de 0,55 metros, foram utilizadas as imagens com o nível momentâneo entre 0,45 e 0,65 m. As análises da variabilidade da linha de costa consideram os dados encontrados dentro dos intervalos máximos e mínimos de nível observado.

3.3 DADOS HIDRODINÂMICOS

Os dados horários de nível das marés observadas foram fornecidos pela EPAGRI/CIRAM, coletados na estação maregráfica da Caieira da Barra do Sul, em Florianópolis (EPAGRI, 2020). Além disso, foram utilizados dados horários do modelo de reanálise ERA5 *Copernicus Climate Change Service* (C3S) da altura significativa, período médio e direção das ondas (HERSBACH, 2018), desta maneira, foi possível identificar relações entre as maiores taxas de recuo da linha de costa e a distribuição da energia de ondas incidentes. Para o cálculo da estimativa do *tidal offset* incorporado nas análises do *CoastSnap*, foram utilizados dados altura significativa de onda e de período típico de onda, 1,7 m e 10,6 s, respectivamente, oriundos de uma boia *Waverider* direcional ancorada a 35 km da costa da ilha de Santa Catarina (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Participação pública na coleta das imagens do *CoastSnap*

Ao longo de 14 meses do registro de imagens, entre fevereiro de 2019 e abril de 2020, foi registrada a participação pública no processo de coleta de dados. Cerca de 42 pessoas participaram enviando suas imagens para as nossas plataformas digitais. O total de imagens

recebidas foi de 330. O *Instagram* foi a plataforma digital mais utilizada para o compartilhamento de imagens por pessoa, enquanto o *Whatsapp* foi o canal onde mais se recebeu imagens, em decorrência do envio frequente efetuado por alguns participantes moradores da região (Figura 6).

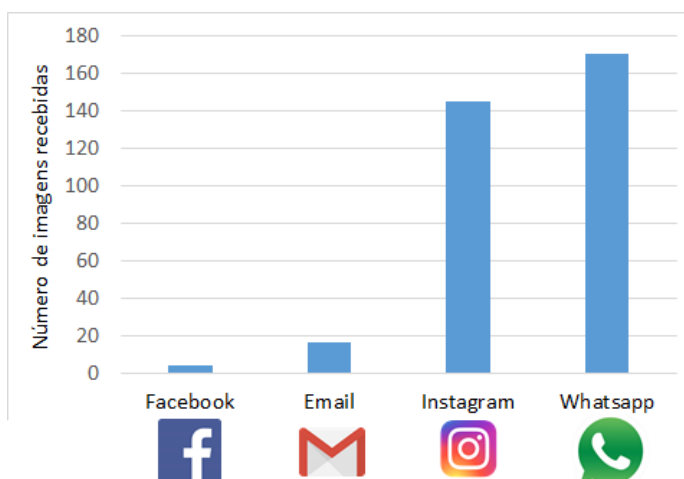


Figura 6: Número de imagens compartilhadas em diferentes plataformas digitais.

As imagens recebidas podem ser diferenciadas em duas categorias: *snap* e *timex*. A primeira, se refere a fotografia instantânea, de obtenção imediata do registro, sendo esse o tipo recebido com maior frequência. Já a segunda categoria se refere a imagem um pouco mais elaborada, sendo uma fotografia de longa exposição, enviada por usuários considerados mais avançados e acostumados com processamento de imagens. Nesse tipo de imagem, ao longo de aproximadamente 60 s, entre o momento de captura e o registro final, são geradas sucessivas imagens onde o produto final é a média da soma de *frames* (quadros de vídeos). Do total das imagens retificadas (170) cerca de 84% são do tipo *snap* e 13% do tipo *timex*. Na última subseção será demonstrado as potencialidades do uso das imagens *timex*.

4.2. Relação entre métodos de mapeamentos da linha de costa: *in situ* (RTK) e remoto (*CoastSnap*)

Foi realizada a análise da diferença entre as linhas de costa obtidas, simultaneamente, por meio do RTK e pelo mapeamento via rotinas computacionais, da imagem coletada em 25 de março de 2019 (Figura 7a). Os dados mostram que a magnitude da diferença, em metros,

entre os métodos obteve um erro médio quadrático (RMSE) de 3.95 m, valor similar encontrado por Harley *et al.* (2019), demonstrando boa precisão entre estes métodos. O sinal negativo resultante da diferença entre os métodos indica que os pontos extraídos pelo *CoastSnap* estão ligeiramente mais próximos da água, em relação aos pontos adquiridos pelo RTK. Os dados provenientes do RTK também têm influência da percepção da pesquisadora durante o campo, a experiência e a constância na medição, ao longo da interface entre a água e a areia, são fatores que podem interferir no resultado final do mapeamento da linha de costa. (Figura 7b).

Por fim, os dois métodos se mostraram eficientes para a realização das medições. O *CoastSnap* é uma ferramenta que apresenta uma ótima relação custo/benefício em comparação ao RTK. Devido ao baixo custo de instalação da estação *CoastSnap*, e em virtude da pequena diferença encontrada entre os métodos, o *CoastSnap* revelou-se como uma ferramenta promissora para análise da linha de costa.

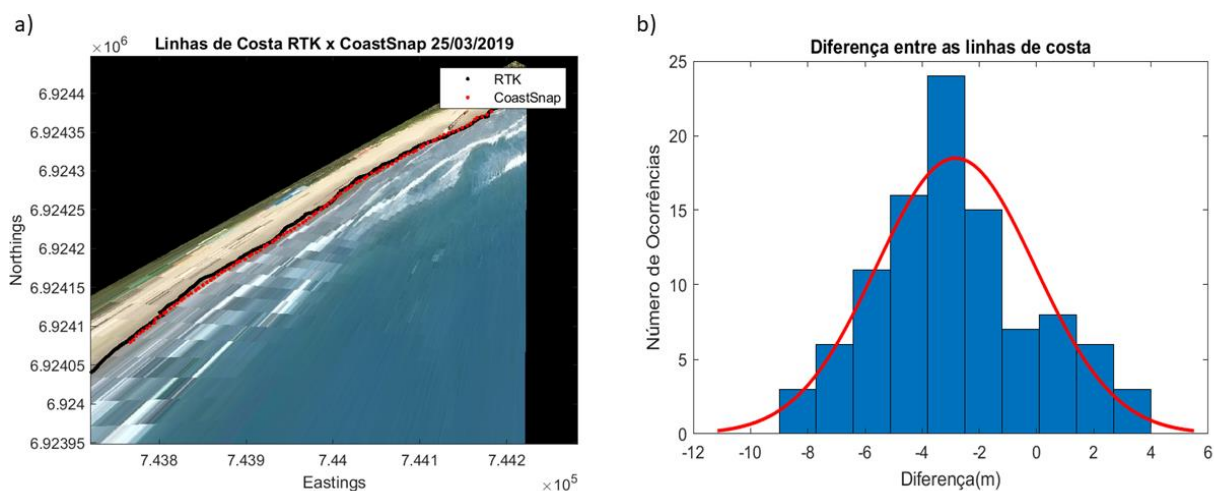


Figura 7: a) Imagem do dia 25 de Março de 2019, retificada para coordenadas planas, contendo a linha de costa detectada pelo *CoastSnap* e aquela medida em campo com RTK. b) Histograma da diferença, em metros, calculada entre as medições realizadas *in situ* e remotamente a curva em vermelho indica a curva de distribuição normal dos dados.

4.3. Variabilidade e tendência da linha de costa em diferentes escalas espaço-temporais

Para facilitar a análise e a interpretação dos resultados, foram realizadas diferentes divisões espaço-temporais na área de estudo. O arco praial Pântano do Sul - Açores foi dividido em cinco transectos e estudados através da ferramenta *CoastSat*. Como já visto anteriormente, dos cinco transectos, dois encontram-se na área de alcance monitorada pelo *CoastSnap* (Figura 1).

Os intervalos temporais foram divididos na escala de curto a médio termo (1 ano, 7 anos e 35 anos). Duas fontes de dados foram empregadas nas análises entre 2019 a 2020: imagens recebidas pelos colaboradores do *CoastSnap*, e, para o *CoastSat*, todas as imagens disponíveis das missões Landsat 8 e Sentinel-2, e possíveis de terem mapeadas as respectivas linhas de costa, totalizando 125 imagens, das quais 37 foram utilizadas para o cálculo de tendência da variação da linha de costa, respeitando o intervalo de nível do mar estabelecido.

Para o período entre 2013 a 2020, das 276 imagens mapeadas provenientes do Landsat 8 e do Sentinel-2, 83 imagens, que se encontravam dentro do intervalo de nível do mar estabelecido, foram utilizadas para o cálculo de tendência. Já na escala entre 1986 a 2021, foram utilizadas todas as imagens disponíveis dos satélites Landsat 5, 8 e Sentinel-2, nos meses de janeiro e de julho, totalizando 98 imagens analisadas (Tabela 1).

Tabela 1: Distribuição, quantidade e fonte das imagens utilizadas, por período, nos mapeamentos.

Período	Períodicidade	Número de Imagens Utilizadas	Fonte da Imagem
14/02/2019 à 20/06/2020	Mensal	130	Colaboradores <i>CoastSnap</i>
31/02/2013 à 31/12/2020	Mensal	276	Landsat 8 e Sentinel-2 (<i>CoastSat</i>)
12/01/1986 à 30/07/2021	Semestral	98	Landsat 5, 8 e Sentinel-2 (<i>CoastSat</i>)

4.3.1 Escala temporal curto termo: 2019 - 2020

As imagens coletadas fornecidas pela comunidade dentro do sistema de monitoramento *CoastSnap* entre 2019 e 2020 foram retificadas e as respectivas linhas de costa mapeadas. Do total de imagens recebidas, 172 foram processadas e adicionadas ao banco de dados, um total de 130 foram retificadas e tiveram suas linhas de costa mapeadas (equivalente a 75%) usando a

técnica de detecção apresentada na metodologia. Os demais 25% foram rejeitados automaticamente pelo algoritmo de detecção devido a problemas de luminosidade, reflexo da luz solar sobre a superfície do mar, sombras na praia, ausência de algum ponto de controle necessário para a retificação, entre outras razões como a movimentação do suporte da câmera para a captura de imagens.

É possível observar através das linhas de costa mapeadas através do *CoastSnap* que, durante o período de estudo, a largura da praia flutuou significativamente principalmente em associação com as marés, as ondas e outros eventos oceânicos e atmosféricos (Figura 8 e 10a). Para o cálculo de tendência, da série temporal dos dados do *CoastSnap*, em metros por ano, foram utilizadas 44 imagens, sendo as que se encontravam dentro do intervalo de nível entre 0,32 e 0,52 m (Figura 10a).

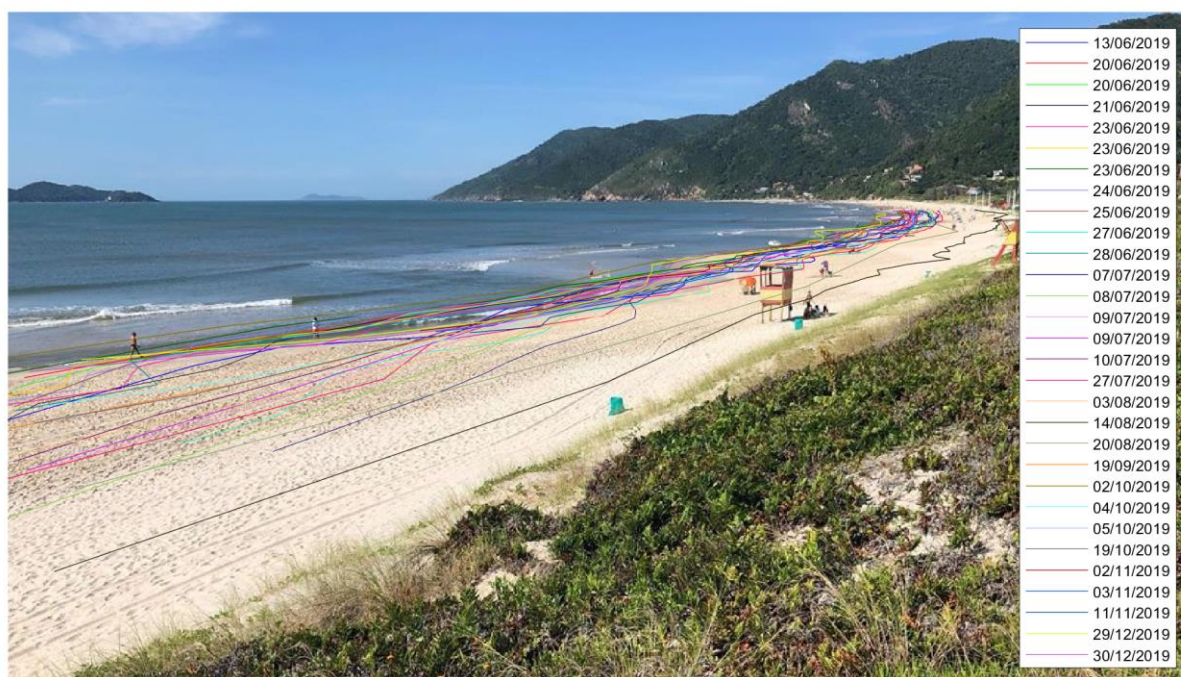


Figura 8: Diferentes linhas de costa mapeadas e ilustradas sobre a imagem oblíqua de 30 de dezembro de 2019, às 08 h e 49 min.

As imagens utilizadas nas análises de tendência e variação da linha de costa, do conjunto de dados do *CoastSat* para as escalas de médio termo foram todas aquelas disponíveis no banco de dados e que passaram pelo pré e pós processamento. Realizou-se o processamento e mapeamento das linhas de costa em 124 imagens, em seguida foi feita a correção dos dados pelo nível da maré (Figura 9).

É notável que as imagens são adquiridas em diferentes momentos da maré e ondulações incidentes, essa diferença é suavizada pela correção citada na metodologia. Para o cálculo de tendência da largura da praia 37 imagens foram utilizadas entre o intervalo de nível de 0,45 e 0,65 m (Figuras 9 e 11). Em 2019, os maiores valores de nível foram observados nos meses de julho e agosto, já em 2020 os maiores níveis aconteceram em fevereiro, abril, maio e julho.

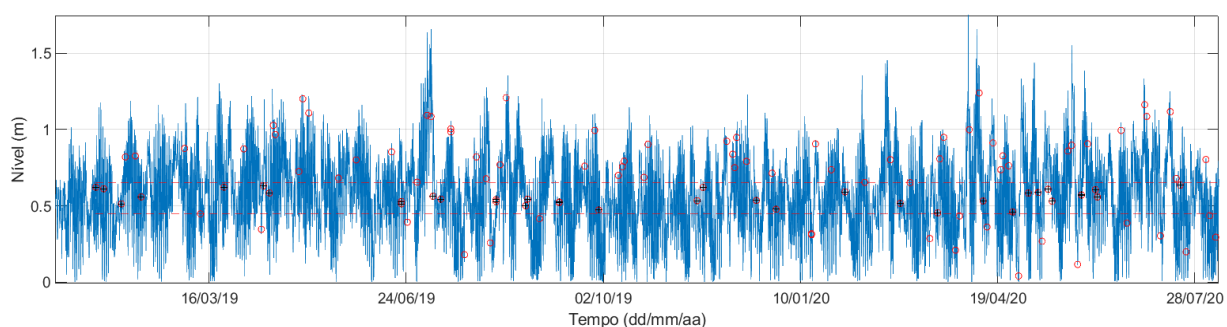


Figura 9: Distribuição das imagens do *CoastSat* utilizadas na série temporal por nível (círculos vermelhos). Entre as linhas tracejadas vermelhas constam as imagens utilizadas (círculos vermelhos com centro preto) na análise de tendência.

A partir dos resultados obtidos pelo mapeamento das linhas de costa foi possível caracterizar e quantificar a tendência da largura da praia. O conjunto de linhas de costa mapeadas pelo *CoastSnap* demonstram que a praia se encontra em estabilidade com uma leve tendência à acresção durante o período analisado, apresentando uma tendência de aumento da largura na ordem de $+0,05$ m/mês (Figura 10), valor este, considerado como sendo indicador de estabilidade (ESTEVEZ & FINKL, 1998). Todavia, as maiores variações da largura da praia foram quantificadas na ordem de 50 m, levando em consideração os diferentes valores de nível do mar.

Para melhor compreensão das razões da variabilidade da linha de costa e largura da praia (Figura 10b), foram utilizados dados de direção, altura e período significativos para caracterizar o regime de ondas atuante no período analisado (Figura 10c, 10d e 10e).

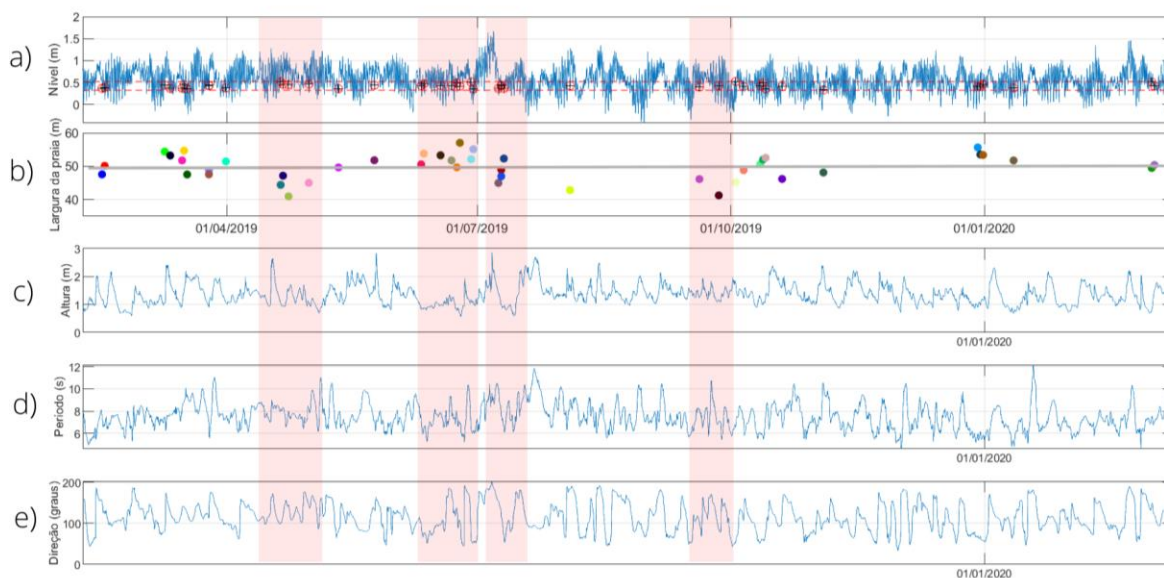


Figura 10: Em a) os dados de nível observado durante o período de estudo, entre as linhas vermelhas tracejadas estão indicadas as imagens utilizadas para análise da tendência; b) posição média da linha de costa entre fevereiro de 2019 e março de 2020; c) altura significativa das ondas (ERA5); d) período médio de ondas (ERA5) e; e) direção das ondas (ERA5). Em vermelho destaca-se a faixa com os maiores e menores valores encontrados para a linha de costa.

Já os dados das linhas de costa extraídas pelo *CoastSat* entre os transectos 2 e 3 obtiveram uma variação máxima de 75 m. A tendência da largura da praia para o período entre 2019 e 2020 foi de $-0,82$ m/mês (Tabela 2), valor este indicativo de que os eventos erosivos (com destaque para 16 de abril, 09 de julho e 26 de agosto de 2019 e 05 de maio em 2020) predominaram em relação aos eventos acrescivos neste período (17 de janeiro, 21 de março e 30 de dezembro de 2019 e 19 de julho de 2020) (Figura 11).

A magnitude da diferença, tanto na variabilidade da linha de costa quanto na taxa de tendência da largura da praia, possivelmente se deve ao fato da diferença entre os métodos ao considerar a influência da ação das ondas (*wave runup*) sob a face da praia, além disso, o *CoastSat* analisou apenas dois transectos na região onde o *CoastSnap* analisou uma média de 38 transectos para a mesma região. Ademais, o fator determinante possivelmente é o fato de que as análises do *CoastSnap* tiveram o seu fim em 2 de março de 2020, fazendo com que o evento erosivo de maior intensidade nessa série temporal ficasse de fora da taxa de tendência feita por essa ferramenta.

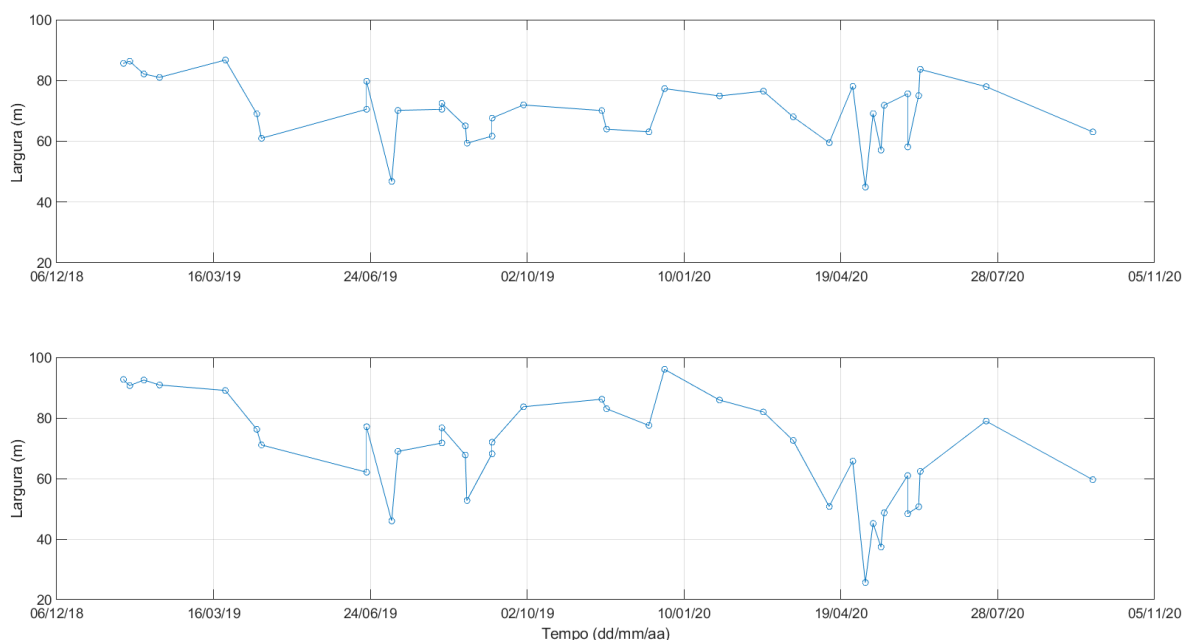


Figura 11: Análise de variação da largura da praia nos transectos 2 e 3 (figura 1), obtido pelo *CoastSat* no período entre janeiro de 2019 a setembro de 2020.

A análise dos dados provenientes do *CoastSnap* e *CoastSat* permite identificar que as menores larguras da praia aconteceram entre abril e maio de 2019 e, entre o começo de julho e agosto do mesmo ano (Figuras 10b e 11). A altura das ondas que precedem estes eventos erosivos é de aproximadamente 3 m (Figura 10c), provenientes do quadrante sul (Figura 10e). É possível observar tanto na figura 9 quanto na figura 10a), um pico do nível observado entre os dias 06 e 07 de julho em 2019, esta elevação foi gerada por um campo de alta pressão adjacente à costa e ocorreu durante a maré de sizígia (LIMA, 2021). A altura de ondas provenientes do quadrante sul alcançou os 3 metros com período maior que 10 segundos (Figura 10 c, d e e). Apesar da análise de tendência da linha de costa obtida por ambas ferramentas não considerar estas datas para a análise, visto que o nível do mar no momento da aquisição da imagem se encontra fora do intervalo pré determinado, o elevado nível e o efeito resultante da ação das ondas sobre a praia pode ser observado até setembro de 2019 (Figura 11).

A largura da praia se manteve acima da média em 29 de junho de 2019 (Figura 10b; Figura 11), dias antes da passagem de um ciclone extratropical que coincidiu com a maré de sizígia, “A segunda maior magnitude de maré já medida pela epagri em 8 anos de monitoramento”¹. Maiores larguras também foram observadas pelas ferramentas entre janeiro e fevereiro de 2020 (Figura 11).

¹ <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2019/07/08/costa-de-santa-catarina-registra-super-mare-no-inicio-de-julho/>

Dia 03 de abril² de 2020 (Figura 12.1b) e 30 de junho de 2020³ ocorreu a passagem de dois ciclones no litoral sul do Brasil, estes eventos aconteceram concomitante com maré de sizígia, ampliando o alcance das ondas em direção a praia e a consequente remobilização de sedimento, gerando um déficit sedimentar posterior a estes eventos (Figura 11).

As marés de tempestade intensificam o alcance das ondas com maior intensidade sobre a praia neste período, outono e inverno, esse fenômeno é impulsionado principalmente devido aos gradientes de pressão atmosférica e, consequentemente, da intensidade dos ventos sobre a superfície dos oceanos (STANEVA *et al.*, 2016). Além disso, os ventos do quadrante sul possuem maior intensidade e geralmente estão associados a eventos de agitação marinha (TRUCOLLO, 1998; KRUEGER, 2011) tendendo a gerar empilhamento de água na costa, influenciando no avanço temporário do mar em direção às porções superiores do perfil praiial (RUDORFF & BONETTI, 2010; MULER & BONETTI, 2014). O recuo momentâneo da linha de costa é uma consequência natural de episódios de erosão, uma vez que a morfologia praiial se ajusta para absorver a energia das ondas.

Nas imagens de 09 e 21 de julho de 2020, mês seguinte ao período das menores larguras da praia (entre abril, maio e junho de 2020), é possível observar a recuperação do perfil praiial com ganho sedimentar em relação ao período anterior (Figura 11). Possivelmente, a diminuição da energia das ondas possibilitou o retorno dos sedimentos em direção à praia.

Embora a análise da variação da linha de costa realizada através das imagens do CoastSnap tenha resultado em uma tendência de estabilidade da largura da praia, análises das imagens recebidas no mês de março e abril de 2020 indicam a retração da duna frontal, iniciando a formação de uma escarpa erosiva (Figura 12.1b). Esse evento foi concomitante à maré de sizígia e à passagem de um ciclone extratropical no Oceano Atlântico Sul, perceptíveis na Figura 10 pelo maior dado de nível observado durante o período analisado, culminando também no desabamento da passarela de acesso à praia, e consequentemente do suporte da tomada de fotografias.

² <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2020/04/04/ciclone-provoca-mare-alta-e-ressaca-e-litoral-de-sc-sofre-danos.ghtml>

³ <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/07/07/ventos-em-sc-tempestades-ou-ciclone/>

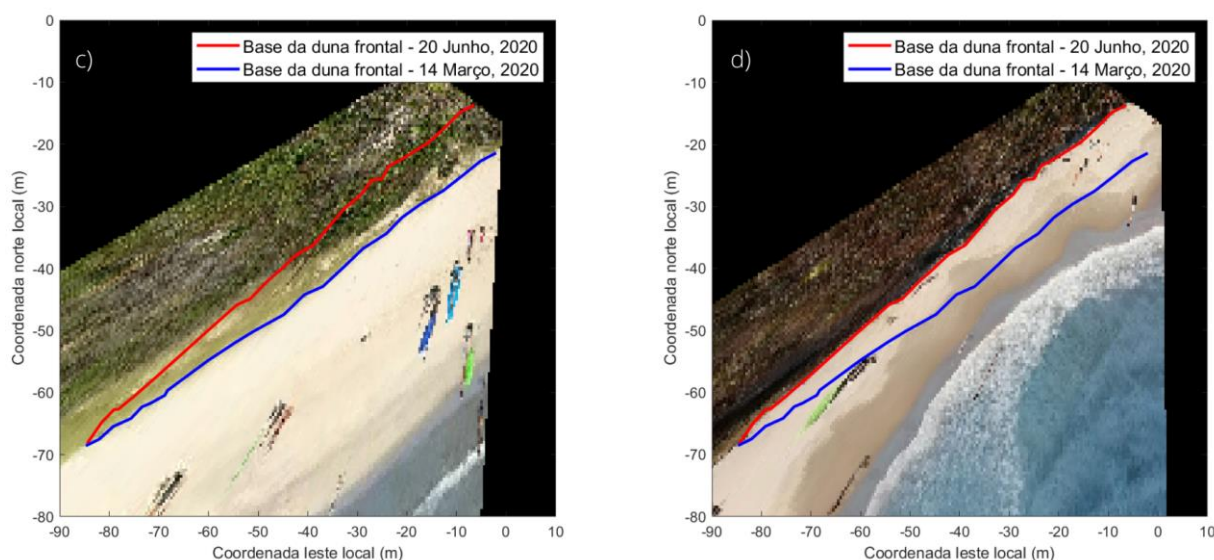
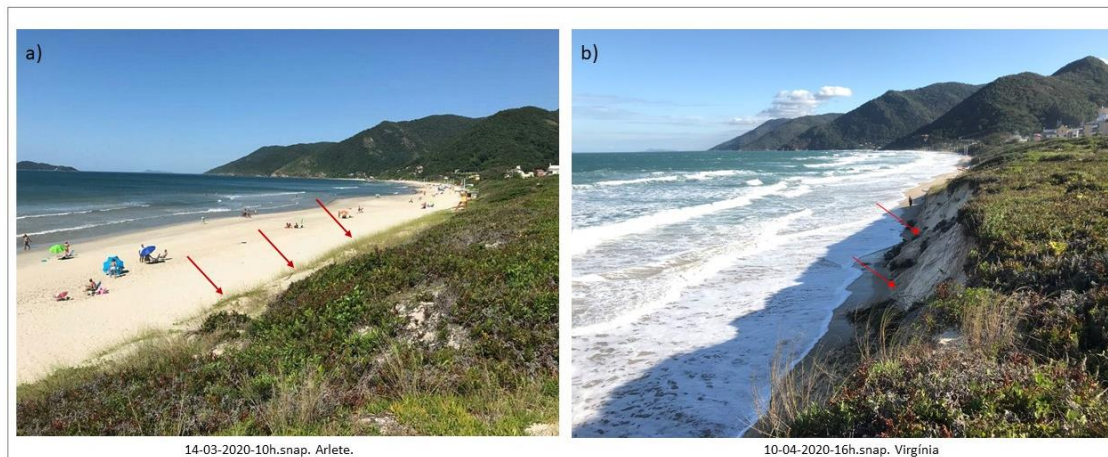


Figura 12: Imagem da praia com setas vermelhas indicando aspectos característicos da duna frontal antes (a) e depois (b) do episódio de erosão. Delimitação da duna frontal em diferentes datas. c) Imagem retificada de 14 de março de 2020. d) Imagem retificada de 20 de junho de 2020.

A área de retração da duna frontal calculada foi de 546.86 m² (Figura 12 c,d). Em praias em equilíbrio dinâmico, a tendência é que a areia retorne à praia durante períodos de calmaria (menor energia de ondas) e que se restabeleça a presença da duna frontal, a depender do transporte e suprimento sedimentar. No entanto, esse processo pode demorar anos para ocorrer (MUEHE *et al.*, 2015).

Pode-se observar na Figura 12.a) a presença de vegetação do tipo gramíneas na duna frontal, vegetação típica de dunas frontais em praias em estado de estabilidade/acresção. O processo de acresção da praia depende tanto do transporte sedimentar quanto do intervalo de tempo entre cada episódio de acresção/erosão (REBELO & BRITO, 2004). As dunas frontais

presentes na figura 12.b em comparação com a figura 12.1, são inclinadas devido a presença da escarpa erosiva. É possível perceber tufo de vegetação e raízes expostas na base das dunas, indicadores de erosão.

As dunas frontais são elementos geomorfológicos importantes no que tange a compreensão dos processos morfodinâmicos atuantes na praia, sendo boas indicadoras do processo de evolução do litoral. As dunas que se formam em períodos de acresção ou erosão têm morfologias distintas e distribuição de vegetação diferentes, como reflexo dos processos que sobre elas atuam (REBELO & BRITO, 2004).

4.3.2 Escala temporal médio termo: 2013 - 2020

Um dos fatores da escolha deste intervalo temporal foi a disponibilidade do banco de dados de nível fornecido pelo marégrafo - EPAGRI - CIRAM durante o período entre 2013 a 2020. Foram utilizadas 276 imagens dos satélites L8 e S2 para o mesmo período. Uma vez que as imagens são coletadas em diferentes horários e estágios de maré (Figura 14), foi feita a correção desse dado antes da análise da variação e tendência da linha de costa.

As distribuições das linhas de costa mapeadas na área de estudo são observadas na Figura 13. Embora as linhas estejam bem distribuídas transversalmente na praia, é possível observar certa predominância das linhas mais claras (mais recentes) em retrogradação em relação às linhas mais escuras (mais antigas).

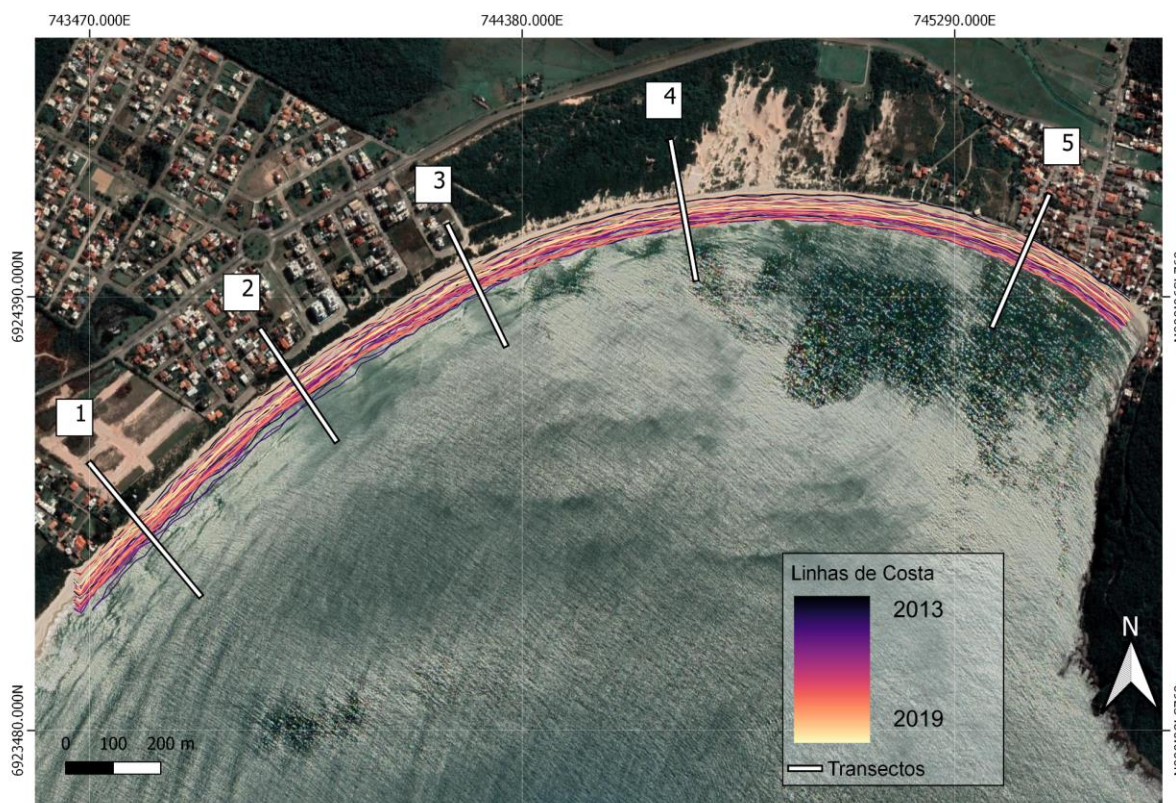


Figura 13: Mapa da área de estudo contendo os 5 transectos e as linhas de costa mapeadas. As linhas com coloração mais escuras representam as mais antigas (2013) e as com coloração mais claras as mais recentes (2019).

As imagens utilizadas no mapeamento das linhas de costa distribuídas pelo nível do mar mostram que as imagens são obtidas pelos satélites em diferentes momentos de nível ao longo da série temporal. Foi detectado picos de maré observada entre 2013 e 2020, principalmente nos meses de outono e inverno. Em 20 de maio, 15 de setembro e 31 de outubro de 2016, 18 de agosto de 2018, 03 de julho de 2019, 04 de abril e 30 de maio de 2020 foram observados dados de nível maiores que 1,4 m. Já os anos 2014, 2015 e 2017 foram os períodos que apresentaram menores valores de nível.

Os picos de nível observados nesses meses estão em concordância com as maiores alturas significativas de onda encontradas nessas estações por Krueger (2011) e as maiores frequências de ciclogêneses encontradas para o mesmo período por Gan & Rao (1991). Em um estudo feito por Bitencourt e colaboradores (2002) foi observado que os eventos de agitação marinha e ressacas ocorrem com maior frequência também nos meses de outono e inverno.

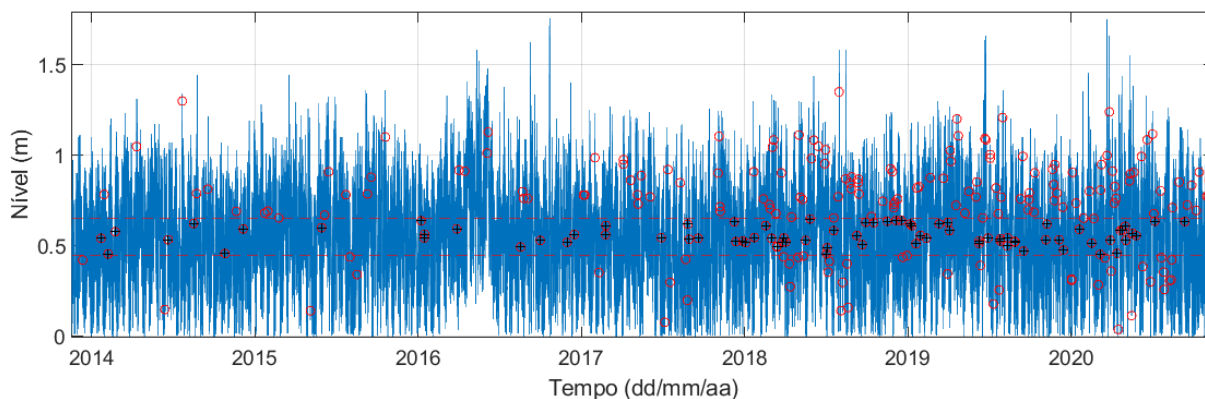


Figura 14: Distribuição das imagens do *CoastSat* utilizadas na série temporal por nível (círculos vermelhos). Entre as linhas tracejadas vermelhas constam as imagens utilizadas (círculos vermelhos com centro preto) na análise de tendência.

De forma geral, as maiores larguras da praia são observadas no verão, percebendo-se então um padrão sazonal na variação da linha de costa, embora esse padrão não seja tão expressivo. A variação máxima da linha de costa é da ordem de 80 m. A tendência da variação da largura da praia é de -4,3 m/ano, -3,96 m/ano, -3,96 m/ano, -2,88 m/ano e -1,44 m/ano nos transectos de 1 a 5, respectivamente. É notável uma diminuição na magnitude da tendência erosiva em direção ao setor nordeste da praia (Tabela 2). Apesar da ocupação humana se apresentar no pós-praia nessa localidade, a proteção parcial da ação das ondas, possivelmente, minimiza o efeito erosivo das ondulações na praia.

Os anos de 2016 a 2020 foram os que apresentaram as menores larguras da praia. Em outubro de 2016, agosto de 2017, setembro de 2018, agosto de 2019 e maio de 2020 foi observado uma diminuição considerável na largura. A maior largura da praia se apresentou em dezembro de 2014 (Figura 15).

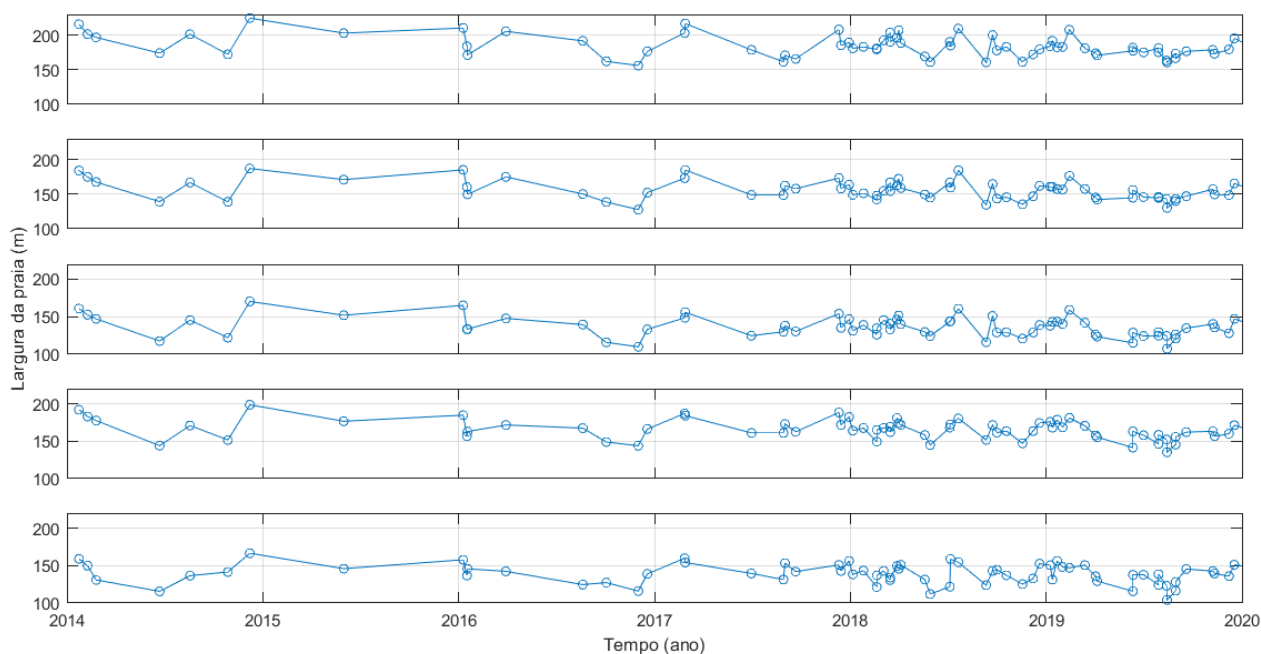


Figura 15: Análise de variação da linha de costa nos 5 transectos (Figura 13) obtida pelo CoastSat no período entre 2013 a 2020.

Em 28 de outubro de 2016 ocorreu uma tempestade com a passagem de ciclone no sul do Brasil, com a duração de três dias, em condição de maré de sizígia, devido a passagem de uma onda de plataforma e constantes ventos de sul, que proporcionaram um consequente empilhamento do nível do mar, gerando uma sobrelevação anormal do nível do mar (ALVES, 2020). A altura média e máxima das ondas atingiu 3,7 m e 5,1 m na Ilha de Santa Catarina (LEAL *et al.*, 2020; LIMA, 2021). Esse evento refletiu diretamente na largura de diversas praias do sul do Brasil (BORGES, 2017; BROSE *et al.*; JANTSCH, 2019), inclusive no arco praial Pântano do Sul (Figura 15).

Uma tempestade em maio de 2017 gerada por ciclone extratropical, durante maré de quadratura (LIMA, 2021) foi concomitante com o recuo da linha de costa registrado na série temporal (Figura 15). A altura máxima de onda passou de 4 m ocasionando eventos erosivos também em outras localidades da ilha de Santa Catarina (LEAL *et al.*, 2020; LIMA, 2021).

Em relação a série temporal anterior, 2019 e 2020, os valores de tendência da largura da praia entre 2013 e 2020 se mostraram menos erosivos (Tabela 2), indicando que a escolha de diferentes escalas temporais tem influência direta nos valores das taxas de erosão

4.3.3 Escala temporal médio termo: 1985 - 2020

A menor disponibilidade de imagens dos satélites L5 e L7 em relação ao Sentinel-2, faz com que o número de linhas de costa identificadas no período entre 1985 a 2016 sejam menores em contraste ao período seguinte, de 2017 a 2020. Analisando qualitativamente a figura 17, é perceptível, entre os transectos 1 e 3, que as linhas de costa mapeadas nos anos entre 2000 e 2021 se apresentam em retrogradação em relação ao período anterior.

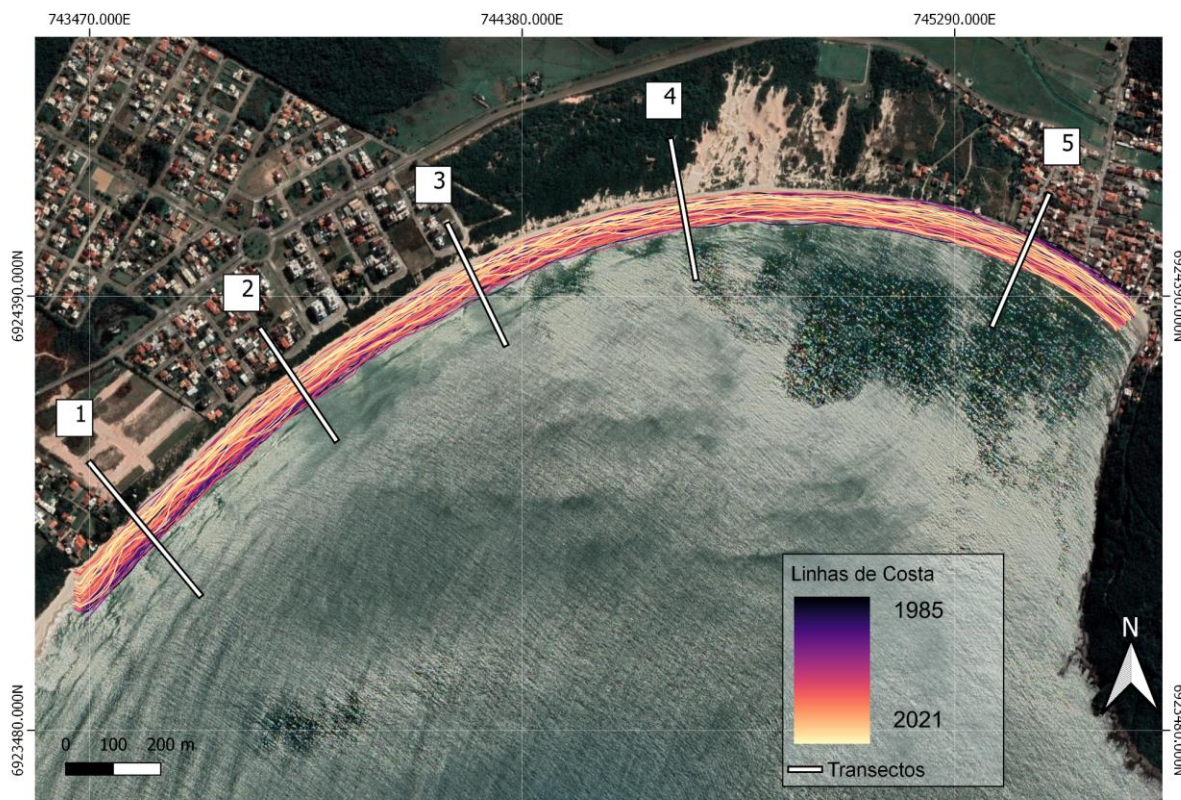


Figura 16: Mapa da área de estudo contendo os 5 transectos definidos e as 98 linhas de costa mapeadas. As linhas com coloração mais escuras representam as mais antigas (1985) e as com coloração mais claras as mais recentes (2021).

A variação máxima da linha de costa foi de aproximadamente 80 m enquanto que a tendência de variação da largura da praia foi de -0,7 m/ano, -0,6 m/ano, -0,4 m/ano, -0,1 m/ano, +0,2 m/ano respectivamente nos transectos de 1 a 5, valores estes similares aos encontrados por Luijendijk *et al.* (2018) em 5 transectos para a mesma região, cujas posições se apresentam relativamente próximas às do presente estudo. Estes valores são considerados como indicadores de praia em estabilidade (LUIJENDIJK *et al.*, 2018) apresentando leve tendência erosiva.

É possível perceber um padrão geral de eventos erosivos nos meses de outono e inverno e acrescivos no verão também para esse conjunto de dados. O conjunto de linhas de costa com tendência de recuo são: agosto de 1996, 21 de julho de 1993, agosto de 2020, outubro de 2001,

julho de 2002, agosto de 2003 e agosto de 2010, além das demais, já citadas anteriormente, observadas também nessa série temporal (Figura 17).

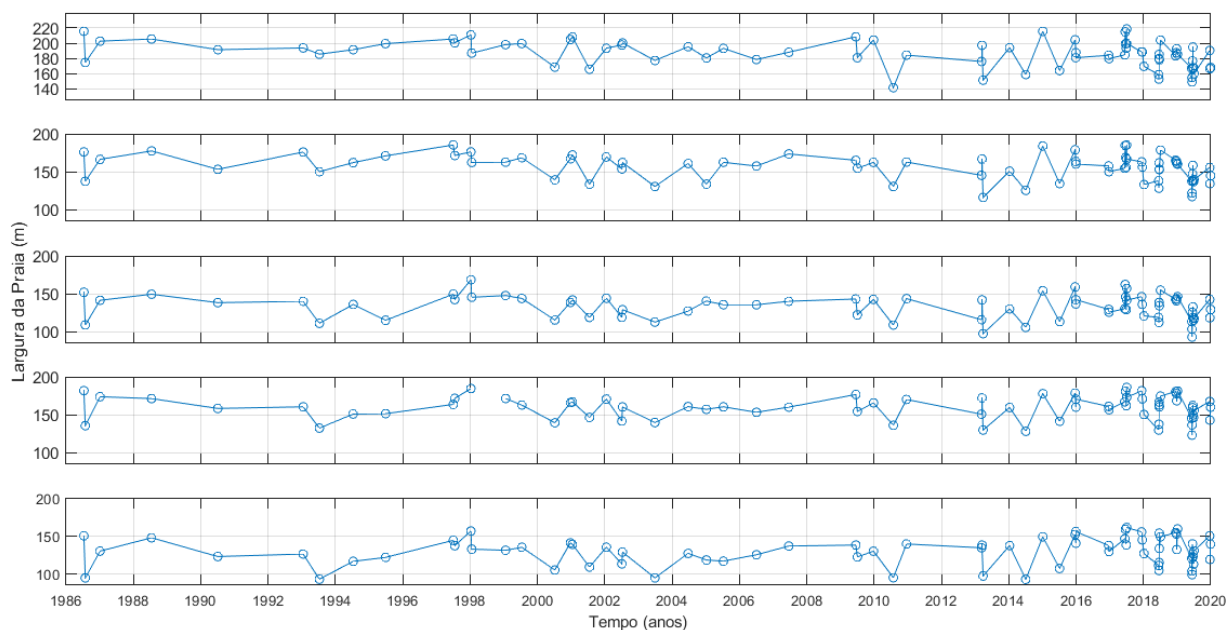


Figura 17: Série temporal da variação da linha de costa ao longo dos 5 transectos (Figura 16) entre 1986 e 2021.

Nos 35 anos analisados, os eventos erosivos ocorreram sem continuidade suficiente para determinarem uma forte tendência erosiva a longo prazo. Entretanto, em médio termo a ocorrência dos eventos erosivos representaram a maior intensidade das taxas de tendência erosiva em metros por ano. A alta variabilidade da linha de costa, apesar de temporária, pode apresentar taxas de erosão mais extremas do que as evidenciadas em tendências de longo prazo. Foi visto que em escalas sazonais e interanuais, a magnitude da variabilidade e tendência se intensificam quanto menor a escala temporal.

A constatação de baixa tendência erosiva na análise de 35 anos não diminui as legítimas preocupações acerca dos problemas decorrentes do recuo temporário da linha de costa e da erosão costeira. Conhecer as variações da linha de costa é de grande importância no contexto de planejamento de instalações e benfeitorias, pois em casos extremos e episódicos das flutuações da linha de costa, pode resultar em riscos às estruturas urbanas, moradores e frequentadores da praia. Ademais, é sabido que a altura de ondas, a intensidade e a frequência de eventos climáticos e seus impactos podem ser agravados dadas as mudanças climáticas em curso (CHURCH *et al.*, 2013; REGUERO *et al.*, 2019).

Tabela 2: Valores de tendência da largura da praia em cada transecto nas diferentes escalas temporais

Período/Transecto Tendência	T1	T2	T3	T4	T5
35 anos (m/ano)	-0,72 (m/ano)	-0,36 (m/ano)	-0,36 (m/ano)	-0,11 (m/ano)	+0,18 (m/ano)
7 anos (m/ano)	-4,3 (m/ano)	-3,96 (m/ano)	-3,96 (m/ano)	-2,88 (m/ano)	-1,44 (m/ano)
1 ano (m/mês)	-0,75 (m/mês)	-0,75 (m/mês)	-1,05 (m/mês)	-0,42 (m/mês)	0,24 (m/mês)

4.4. Análise qualitativa das características morfodinâmicas através de observações de oportunidade (*CoastSnap*)

As imagens *timex* (de longa exposição) vem sendo utilizadas como técnica para determinação do estado morfodinâmico praias no momento da observação (COCO, 2005), sendo possível registrar a presença, posição relativa e forma de bancos arenosos dentro da zona de surfe. É possível detectar a posição e forma dos bancos de areia devido à arrebentação das ondas. Também podem ser observadas cavas e canais, onde ocorrem as correntes de retorno, através da ausência de arrebentação das ondas devido a maior profundidade na região dos canais, que faz com que a espuma, decorrente da arrebentação nos bancos, não se apresente nessa região (LIPPMANN & HOLMAN, 1989), sendo assim possível identificar essas feições com facilidade.

Por meio da observação das feições costeiras, foi possível caracterizar os estágios morfodinâmicos em algumas imagens de oportunidade (Figura 18). Nas figuras 18b, c e d, o setor da praia registrado apresenta dois bancos e uma cava longitudinal, enquanto que na figura 18c, 18e e 18f há a presença também de cavas transversais. Nas imagens da Figura 18a e 18f ocorre a presença de canais de correntes de retorno, feições típicas de praias intermediárias.

É possível observar as cúspides praias. Nas imagens Figura 18g e Figura 18i, a alta energia de onda favorece a formação de uma ampla e extensa zona de surfe e a linha de costa tende a ser paralela à costa assim como a direção dos bancos, durante a ocorrência temporária de um estágio morfodinâmico dissipativo.

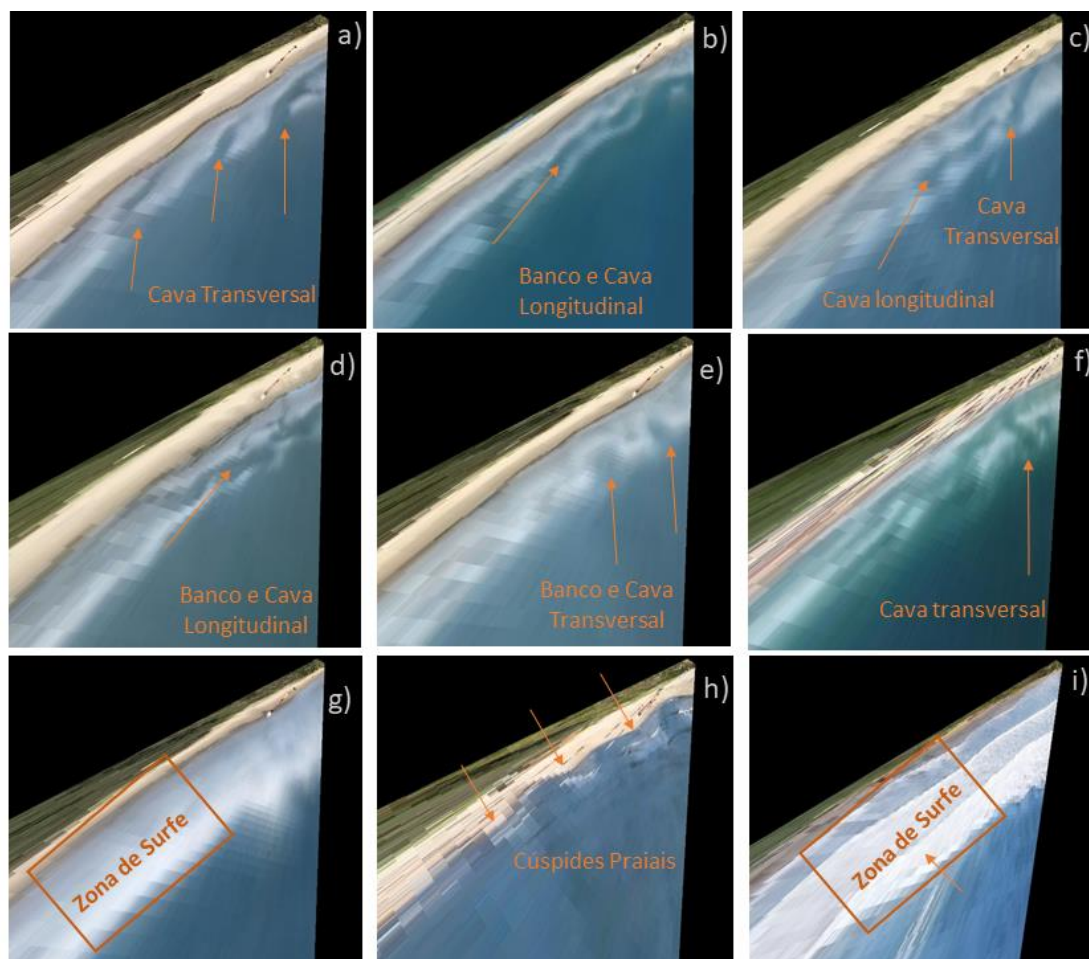


Figura 18: Diferentes estágios morfodinâmicos e feições morfológicas apresentadas nas imagens acima. a) Banco e cava transversal; b) Banco e praia rítmica, apresentam dois bancos e uma cava longitudinal; c) Banco e cava transversal; d) e) f) banco e cava transversal; f) Banco e praia rítmica, cavas transversais e longitudinais; g) i) Praia dissipativa, ampla zona de surfe, quebra de ondas paralelas a costa; h) Banco e cava transversal, cúspides praias.

Em praias de enseada, as variações morfológicas ocorrem após a refração e atenuação das ondas na ante praia (SHORT, 1999a). No caso do arco praiial Pântano do Sul-Açores, a presença de promontórios rochosos produz variações longitudinais na altura e direção das ondas, gerando variabilidade na forma de praia em planta e tipo de praia (OLIVEIRA, 2009).

Um mesmo trecho de praia pode variar entre diferentes estágios morfodinâmicos, a depender da energia e direção de ondas vigente em um determinado espaço de tempo. Apesar da possível alteração periódica, uma praia específica tende a apresentar um estágio modal predominante, no caso da praia dos Açores, o estágio morfodinâmico intermediário foi majoritário durante o ano de 2019 a 2020, corroborando os dados publicados por Klein *et al.* (2005) e Oliveira (2009). Estudar a presença das correntes e feições costeiras é um passo importante na compreensão do processo de dinâmica sedimentar, e, o *CoastSnap* se mostrou

uma ferramenta promissora para análises das características morfodinâmicas da praia, sobretudo para as imagens timex.

5. CONCLUSÃO

A proliferação de celulares com câmera e do uso de redes sociais, abrem novos caminhos para o monitoramento das variações na linha de costa. A ciência cidadã conferida pela participação da comunidade no processo de envio de imagens, principalmente por *instagram* e *whatsapp*, foi de grande valia para a compreensão da variabilidade temporal da linha de costa, tanto a curto quanto a médio prazo.

As menores larguras da praia detectadas pelo *CoastSnap*, entre 14 de fevereiro de 2019 e 03 de março de 2020, aconteceram de abril a maio, e, começo de julho a setembro, enquanto entre esse período, no mês de junho, a tendência da largura da praia se manteve acima da média. A maior variação da largura da praia foi quantificada na ordem de 50 m. Essa oscilação entre períodos erosionais e acrescionais, relacionados aos eventos climáticos, garantiram um caráter de equilíbrio dinâmico durante o período analisado pelo *CoastSnap*. Com a utilização dessa metodologia foi possível acompanhar e quantificar a variação de uma praia em estabilidade, com média de aumento na largura da praia 0,04 m ao mês, para uma praia em processo erosivo.

A disponibilidade gratuita de imagens de satélite e as rotinas computacionais permite analisar a variabilidade e tendências da largura da praia em diferentes escalas temporais. As linhas de costa extraídas pelo *CoastSat* entre 10 de janeiro de 2019 e 02 de agosto de 2020, obtiveram uma variação máxima da linha de costa de 75 m, apresentando uma tendência erosional de - 0,82 m/mês, sendo esse valor indicador de processos erosivos em curso.

Já na escala temporal entre 2013 e 2020, a maior variabilidade da linha de costa foi de 80 m, e a tendência da largura da praia, respectivamente da porção nordeste para sudoeste do arco praial, atingiu os valores de -4,3 m/ano, -3,96 m/ano, -3,96 m/ano, -2,88 m/ano e -1,44 m/ano. A análise de 35 anos obteve uma variação máxima da linha de costa de 80 m. A tendência da largura da praia foi de -0,7 m/ano, -0,6 m/ano, -0,4 m/ano, -0,1 m/ano, +0,2 m/ano ao longo do arco praial.

Com exceção do transecto 5, na análise da escala temporal de 35 anos, todos os resultados encontrados para os demais transectos indicam que os eventos erosivos prevaleceram em detrimento aos acrescionais, sendo possível observar a resposta da praia frente a eventos meteorológicos. Foi observado que a escolha de diferentes escalas temporais tem influência

direta nos valores das taxas de erosão, a magnitude dos valores identificados se intensifica quanto menor a escala temporal, e são suavizados quanto maior a escala. Nos cinco transectos analisados a tendência erosional de linha de costa se mostrou maior nos transectos mais a sul em relação aos transectos a nordeste.

Em futuros estudos, para o *CoastSnap* sugere-se fazer uma análise mais ampla com as imagens de longa exposição, detectando as feições e quantificando a variabilidade temporal e espacial dos estágios morfodinâmicos. Para as investigações com *CoastSat* recomenda-se uma análise mais robusta incluindo dados de ondas e ventos em toda a série temporal. Recomenda-se também a associação entre o recuo máximo da linha de costa e a taxa de erosão costeira, com a finalidade de se estabelecer faixas de proteção costeiras que reflita e respeite as constantes variações morfodinâmicas no arco praiial Pântano do Sul, seguindo diretrizes do Projeto Orla. Essa análise visa fornecer informações para uma ocupação ordenada e segura, garantindo a saúde do ecossistema praiial e de seus usuários.

Reitera-se ainda, a importância de um monitoramento contínuo para melhor e mais assertiva análise do comportamento da praia frente a eventos climáticos bem como incentivo da participação popular na obtenção e compartilhamento de imagens.

Devido ao caráter “ciência aberta” os estudos aqui apresentados podem ser facilmente aplicados a qualquer praia arenosa de interesse, contribuindo com o monitoramento costeiro e a ciência cidadã.

REFERÊNCIAS

- ALBAGLI, Sarita. Ciência aberta em questão. In: ALBAGLI, Sarita; MACIEL, Maria Lucia; ABDO, Alexandre Hannud (org.). *Ciência aberta, questões abertas*. Brasília: Ibict; Rio de Janeiro: Unirio, 2015. p. 9-26.
- ALMEIDA, Luis Pedro et al. Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE): Shoreline management module. **Environmental Modelling & Software**, v. 140, p. 105033, 2021.
- ALVES, Bruna et al. Modelagem e refinamento hidrodinâmico da Baía de Florianópolis. 2020. Trabalho de conclusão de curso em Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Araújo, C.E.S., Franco, D., Melo, E. & Pimenta, F. Wave regime characteristics of the southern brazilian coast. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, CODEPEC, 6., 2003, Colombo, Sri Lanka. *Proceedings...* Colombo, Sri Lanka, p. 1- 15
- ARAÚJO, R. S. et al. Georreferenciamento de fotografias aéreas e análise da variação da linha de costa. **Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral**, p. 123-138, 2009.
- ARAÚJO, CES et al. Wave regime characteristics of southern brazilian coast. COPEDEC, 6., 2003. In: **Proceedings**. 2003.
- AUDÈRE, Morgane; ROBIN, Marc. Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion (short and medium term) for coastal risk mapping (Vendée, W France). **Ocean & Coastal Management**, v. 201, p. 105452, 2021.
- BIRD, E. CF. *Coastline changes. A global review*. 1985.
- BIRKEMEIER, William A. Time scales of nearshore profile changes. In: **Coastal Engineering 1984**. 1985. p. 1507-1521.
- BITENCOURT, Daniel Pires; QUADRO, M. F. L.; CALBETI, N. O. Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. In: **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu**. 2002. p. 3910-3917.
- BOAK, Elizabeth H.; TURNER, Ian L. Shoreline definition and detection: a review. **Journal of coastal research**, v. 21, n. 4, p. 688-703, 2005.

BORGES, Marina Miguel et al. Comportamento morfossedimentar em escala sazonal da praia Mole-Ilha de Santa Catarina, SC-Brasil. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina.

BROSE, Markus Erwin; SOUTO, Augusto José Pinto; DOS SANTOS, Claudio Soares. Percepções e adaptação aos riscos climáticos no litoral: A reconstrução pós-ciclone de 2016 do Balneário Hermenegildo, RS. **Revista Política e Planejamento Regional**, 2020.

BRUUN, Per. Sea-level rise as a cause of shore erosion. **Journal of the Waterways and Harbors division**, v. 88, n. 1, p. 117-130, 1962.

CAMFIELD, Fred E.; MORANG, Andrew. Defining and interpreting shoreline change. **Ocean & Coastal Management**, v. 32, n. 3, p. 129-151, 1996.

CASTILHOS, Janete Abreu de et al. Estudo evolutivo, sedimentológico e morfodinâmico da planície costeira e Praia da Armação-Ilha de Santa Catarina, SC. 1995.

CHURCH, John A. et al. **Sea level change**. PM Cambridge University Press, 2013.

COELHO, A. L. N. Análise do deslocamento da linha de costa e sua intensidade com base em produtos de sensoriamento remoto. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L.S. (orgs.) **Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 56-73. ISBN 978-65-992571-0-0

COCO, Giovanni et al. The use of imaging systems to monitor shoreline dynamics. In: **1st International Conference on Coastal Zone management and Engineering in the Middle East**. 2005.

DE GOUVEIA SOUZA, Celia Regina; SUGUIO, Kenitiro. The coastal erosion risk zoning and the São Paulo State Plan for Coastal Management. **Journal of Coastal Research**, p. 530-547, 2003.

EMERY, Kenneth Orris. A simple method of measuring beach profiles. **Limnology and oceanography**, v. 6, n. 1, p. 90-93, 1961.

EPAGRI. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Banco de dados de variáveis ambientais de Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 2020. 20p. **(Epagri, Documentos, 310)** - ISSN 2674-9521 (Online)

ESTEVES, Luciana S.; FINKL, Charles W. The problem of critically eroded areas (CEA): An evaluation of Florida beaches. **Journal of Coastal Research**, p. 11-18, 1998.

FISH, M. R. et al. Construction setback regulations and sea-level rise: mitigating sea turtle nesting beach loss. **Ocean & Coastal Management**, v. 51, n. 4, p. 330-341, 2008.

GAN, Manoel Alonso; RAO, Vadlamudi Brahmananda. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991

GRÉ, J. C. R.; ABREU DE CASTILHOS, J.; HORN FILHO, Norberto O. Quaternary deposits of the Pântano do Sul beach, Santa Catarina island, Brazil. **Climas Cuaternários en América del Sur. La Paz, Bolivia**, v. 7, p. 121-131, 1995.

Gre, J.C.R.; Castilho, J.A. & Horn Filho, N.O. 1997. Quaternary deposits of the pântano do sul beach, Santa Catarina Island, Brazil. In: COLÓQUIO FRANCO-BRASILEIRO DE MANEJO COSTEIRO DE ILHA DE SANTA CATARINA, 1997, Florianópolis. Atas., Florianópolis, UFSC, p. 211-218

HARLEY, Mitchell D. et al. Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images. **Coastal Engineering**, v. 150, p. 175-189, 2019.

HERSBACH, H. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. **Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)**, v. 10, 2018. Disponível em: <[ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present](#)>. Acesso em: 20 set. 2021.

JANTSCH, Maiquel. Climatologia de ciclones extratropicais na região sul do Brasil de 2000 a 2016. 2019. Tese em programa de pós graduação em geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HORN FILHO, N. O. Granulometria das praias arenosas da Ilha de Santa Catarina, SC. **Gravel**, v. 4, p. 1-21, 2006.

HORN FILHO, Norberto Olmiro; DE OLIVEIRA, João Sérgio; LEAL, Paulo César. Geologia das 117 praias arenosas da Ilha de Santa Catarina, Brasil. 2017.

KLEIN, A. H. F.; MOCELLIM O.; MENEZES, J. T.; BERRIBILLI, M.; VINTÉM, G.; DAFFERNER, G.; DIEHL, F. L.; SPERB, R. M.; SANTANA, G. G. Beach Safety Management on the Coast of Santa Catarina, Brazil. *Z. Geomorph. N.F.*, Berlin-Stuttgart, v. 141, p. 47-58, 2005.

KLEIN, A. H. F.; MENEZES, J. T.; DIEHL, F. L.; ABREU, J.G.N.; POLETTE, M.; SPERB, R.M.; SPERB, R.C. Santa Catarina – Litoral Centro Norte. In: MUEHE, D. Erosão e progradação no litoral brasileiro. Brasília,DF: MMA, 2006. p. 401-436.

KRUEGER, JAQUELINE. Análise dos Parâmetros Meteorológicos e Oceanográficos dos Eventos de Ressaca, ocorridos entre Janeiro de 2001 a Dezembro de 2010, no Estado de Santa Catarina. **Monografia. Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar (CTTMar), Universidade do Vale do Itajaí**, 2011.

LEAL, Karine Bastos; BONETTI, Jarbas; DE SOUZA PEREIRA, Pedro. Influência da orientação de praia na retração da linha de costa induzida por marés de tempestade: Armação e Canasvieiras, Ilha de Santa Catarina-SC. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 04, p. 1730-1753, 2020.

LIMA, André de Souza de et al. Gestão costeira e mudanças climáticas: uma análise multiescalar da contribuição da legislação e da comunidade científica no Brasil. 2021.

LIPPMANN, Tom C.; HOLMAN, Rob A. Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 94, n. C1, p. 995-1011, 1989.

LUIJENDIJK, Arjen et al. The state of the world's beaches. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.

MARIOTTI, Mara Terezinha, FRANCO, Davide. Análise Arima da Resposta do Nível do Mar à Forçantes Atmosféricas Locais: Florianópolis: LAHIMAR/UFSC, 2001.

MAZZER, Alexandre M.; DILLENBURG, Sérgio. Variações temporais da linha de costa em praias arenosas dominadas por ondas do sudeste da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis, SC, Brasil). **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 1, p. 117-135, 2009.

MAZZER, Alexandre Maimoni. Proposta metodológica para análise de vulnerabilidade da orla marítima à erosão costeira: aplicação em praias arenosas da costa sudeste da Ilha Santa Catarina (Florianópolis, Santa Catarina-Brasil). 2007. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MAZZER, Alexandre Maimoni. Análise da vulnerabilidade costeira com uso de sistema de informação geográfica: uma aplicação ao trecho litorâneo sul da Ilha de Santa Catarina. **SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA**, v. 5, p. 2004, 2004.

MENTASCHI, Lorenzo et al. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.

MUEHE, Dieter Carl Ernst Heino et al. Pulsos erosivos e resposta morfodinâmica associada a eventos extremos na costa leste do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 3, 2015.

MUEHE, D. *et al.* Erosão e progradação do litoral brasileiro. **Brasília: Ministério do Meio Ambiente**, v. 1, p. 475, 2006.

MUEHE, D. Panorama da erosão costeira no Brasil. Brasília: **Ministério do Meio Ambiente (MMA)**, 2018.

MULER, Mariela; BONETTI, Jarbas. An integrated approach to assess wave exposure in coastal areas for vulnerability analysis. **Marine Geodesy**, v. 37, n. 2, p. 220-237, 2014.

NEVES, Jasiel et al. Uso da terra e urbanização dos ambientes costeiros na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. 2017. Dissertação de mestrado. Pós graduação em Geografia

NICHOLLS, Robert J. et al. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 5, n. 1, p. 129-150, 2014.

OLIVEIRA, Bruna A. et al. A high-resolution wave hindcast off Santa Catarina (Brazil) for identifying wave climate variability. **Regional Studies in Marine Science**, v. 32, p. 100834, 2019.

OLIVEIRA, Ulisses Rocha de et al. Comportamento morfodinâmico e granulometria do arco praias Pântano do Sul-Açores, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. **Dissertação de Mestrado em Geografia**, Curso de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

OLIVEIRA, Ulisses R. et al. Características morfodinâmicas da praia do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 3, p. 237-250, 2009.

PIANCA, C.; HOLMAN, R.; SIEGLE, E. Shoreline variability from days to decades: Results of long-term video imaging. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 120, n. 3, p. 2159-2178, 2015.

PUGH, David T. Tides, surges and mean sea level. 1987.

REBÊLO, Luís Pina; BRITO, Pedro Oliveira. A importância das dunas frontais na avaliação da evolução da linha de costa: o caso da praia da Manta Rota. **V encontro de professores de geociências do algarve**, 2004.

REGUERO Borja G.; LOSADA, Iñigo J.; MÉNDEZ, Fernando J. A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. **Nature communications**, v. 10, n. 1, p. 1-14, 2019.

RUDORFF, F. M.; BONETTI, J. Avaliação da suscetibilidade à erosão costeira de praias da Ilha de Santa Catarina. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol**, v. 14, n. 1, p. 9-20, 2010.

SHORT, A.D. 1999a. Beaches. In: Short, A.D. (Ed.). *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Chichester. p. 1-20.

SILVA, Luciana Maria da et al. Modelagem fuzzy aplicada na detecção da vulnerabilidade à erosão costeira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 4, p. 746-764, 2013.

SIMPSON, Murray et al. Coastal setbacks in Latin America and the Caribbean: A study of emerging issues and trends that inform guidelines for coastal planning and development. **Washington, DC: Inter-American Development Bank**, 2012.

SPLINTER, Kristen D.; HARLEY, Mitchell D.; TURNER, Ian L. Remote sensing is changing our view of the coast: Insights from 40 years of monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1744, 2018.

STANEVA, Joanna et al. Coastal flooding: impact of waves on storm surge during extremes—a case study for the German Bight. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 16, n. 11, p. 2373-2389, 2016.

STIVE, Marcel JF et al. Variability of shore and shoreline evolution. **Coastal engineering**, v. 47, n. 2, p. 211-235, 2002.

TURNER, I.L.; AARNINEIOF, S.G.J.; DRONKERS, T.D.T., and MCGRATH, J., 2004. CZM applications of Argus coastal imaging at the Gold Coast, Australia. **Journal of Coastal Research**, 20(3), 739-752. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

TRUCCOLO, Eliane Cristina et al. Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul-SC. 1998.

VOS, Kilian et al. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. **Environmental Modelling & Software**, v. 122, p. 104528, 2019.