

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

FILIPPE AGUIAR ROCHA

**ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA E ANÁLISE TEMPORAL DE
ALTERAÇÕES NO ECOSISTEMA DE DUNAS NO DISTRITO DE QUINTÃO/RS**

PORTO ALEGRE

2024

FILIFE AGUIAR ROCHA

**ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA E ANÁLISE TEMPORAL DE
ALTERAÇÕES NO ECOSSISTEMA DE DUNAS NO DISTRITO DE QUINTÃO/RS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Orientador: Prof. Dra. Tatiana Silva da Silva

PORTO ALEGRE

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Aguiar Rocha, Felipe
ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA E ANÁLISE
TEMPORAL DE ALTERAÇÕES NO ECOSISTEMA DE DUNAS NO
DISTRITO DE QUINTÃO/RS / Felipe Aguiar Rocha. -- 2024.
98 f.
Orientadora: Tatiana Silva da Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,
BR-RS, 2024.

1. Mudanças climáticas. 2. Urbanização. 3.
Influência dos sangradouros. 4. Proteção Costeira. I.
Silva da Silva, Tatiana, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dedico este trabalho

In memoriam de minha mãe

Aurida Inês Aguiar Rocha.

Obrigado por me ensinar

Desde o nascimento

O verdadeiro significado das palavras:

Amor, bondade e família.

“Que seus olhos verdes me guiem”.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me manter de pé e me possibilitar chegar a lugares que jamais imaginei que seriam alcançáveis.

À minha família, em especial, ao meu pai Clovis Oliveira da Rocha, você é meu exemplo de honestidade e bondade, tenho muito orgulho de ter você como pai.

À minha mãe Aurida Inês Aguiar Rocha, que mesmo na ausência física, se faz presente em todos os momentos.

À minha irmã Ana Claudia Aguiar Rocha, por estar sempre ao meu lado.

Às minhas sobrinhas Mariana e Alice que trouxeram força e alegria para a família.

À minha esposa Gabriela Ramos Rocha, obrigado por todo o apoio e por não soltar minha mão.

Aos meus avós, Adão, Clélia, Orides e Teresa (*In memoriam*).

Aos meus padrinhos, Aida, Umberto, Ademar e Josiane.

Aos meus tios, João e Adriano.

Aos meus sogros, Joana e Pedro.

Aos meus primos e todos os meus familiares e amigos que torceram e torcem por mim:

Amo vocês, sem vocês nada disso seria possível!

À minha orientadora Tatiana Silva da Silva, por ter aceitado encarar esta jornada e pelas contribuições inestimáveis na construção desse trabalho e em minha formação.

Aos meus colegas de curso e do Labmodel que participaram, em vários momentos, da construção desse estudo.

À Giuliana Sfredo que não mediu esforços para auxiliar na pesquisa e que esteve presente nos momentos turbulentos e de calmarias, obrigado pela sua amizade.

À CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa.

À Universidade Federal pelo espaço de formação e pelas experiências enriquecedoras.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR).

Obrigado!

Se Deus disse que eu posso, então eu posso! Irei e não temerei mal algum.

Filipenses 4:13

RESUMO

As mudanças climáticas, acentuadas pela ação antrópica, são uma realidade na atualidade, em todo o mundo. Neste contexto, os ecossistemas costeiros como as dunas desempenham um papel fundamental para a proteção costeira, sendo a principal barreira de proteção da população residente aos perigos relacionados ao avanço do mar. No entanto, esses ecossistemas estão sendo afetados diretamente pelo aumento da antropização nos ambientes costeiros, especialmente com crescimento e adensamento das áreas urbanas próximas à linha de costa, onde muitas vezes, ocorrem sobre as dunas frontais. Diante deste cenário, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um Índice de Vulnerabilidade Costeira, integrando dados socioeconômicos e biofísicos, com o objetivo de preencher uma lacuna existente, ao incorporar as informações relacionadas à densidade de sangradouros, também com o propósito de proporcionar uma avaliação abrangente e aprimorada da vulnerabilidade costeira. Adicionalmente, busca-se realizar uma análise espacial temporal de mudanças no ecossistema de dunas, a fim de identificar as atividades antrópicas que contribuem para a redução das dunas e para o aumento de vulnerabilidade costeira. Os resultados obtidos indicam que 54,4% do total de pontos analisados em relação a vulnerabilidade costeira no Distrito de Quintão apresentaram vulnerabilidade baixa, especialmente em locais com menor densidade populacional, enquanto 10,7% apresentaram vulnerabilidade alta, especialmente na área urbana. As áreas urbanas apresentaram índices elevados tanto no Índice de Exposição Biogeofísico, com a presença de dunas menores, aumentando a exposição da população, quanto no Índice de Exposição Socioeconômica com a presença de população mais vulnerável e maior densidade populacional. A Análise temporal das mudanças no ecossistema de dunas do Distrito de Quintão entre 1985 e 2022, indicam um aumento de 993% na área urbana no distrito. Já as áreas de dunas apresentaram uma diminuição em sua área de 34,45%. Neste sentido, o aumento populacional, especialmente na região norte do Distrito de Quintão, contribuiu para a redução das dunas ao longo do tempo. A redução das dunas nesta região, acarretou em maior exposição da população ao risco de inundação e erosão. Neste sentido, destaca-se a importância de medidas que mitiguem o impacto do aumento populacional sobre o ecossistema de dunas que acarretam no aumento da vulnerabilidade costeira. Além disso, espera-se que este trabalho possa subsidiar estudos voltados para

a vulnerabilidade costeira, especialmente para as localidades com a presença de sangradouros.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, Urbanização, Influência dos sangradouros

ABSTRACT

Climate change, accentuated by anthropogenic action, is a current global reality. It directly impacts the coastal environment due to its effects, such as the relative rise in sea levels and the increased frequency of extreme events. In this context, coastal ecosystems like dunes play a fundamental role in coastal protection, serving as the primary barrier to safeguard the resident population from hazards associated with advancing seas. However, these ecosystems are directly affected by the escalating anthropization in coastal areas, particularly with the growth and densification of urban areas near the coastline, often encroaching upon frontal dunes. Especially in southern Brazil, Washouts also contribute to affecting dunes by interrupting frontal dune ridges. These factors result in significant losses in coastal ecosystems and their ability to protect the resident population from coastal risks associated with climate change. Given this scenario, this study aims to develop a Coastal Vulnerability Index by integrating socio-economic and biophysical data, filling an existing gap by incorporating information related to the density of washouts, with the purpose of providing a comprehensive and enhanced assessment of coastal vulnerability. Additionally, the study seeks to conduct a temporal-spatial analysis of changes in the dune ecosystem to identify anthropogenic activities contributing to dune reduction and increased coastal vulnerability. The results indicate that, of the total points analyzed regarding coastal vulnerability in the Quintão District, 54.4% of points exhibit low vulnerability, especially in areas with lower population density, while 10.7% of points show high vulnerability, particularly in urban areas. Urban areas demonstrate elevated indices in both the Biogeophysical Exposure Index, with the presence of smaller dunes, increasing population exposure, and the Socioeconomic Exposure Index, with a more vulnerable population and higher population density. Temporal analysis of changes in the dune ecosystem in the Quintão District between 1985 and 2022 indicates a 993% increase in urban area, while dune areas experienced a 34.45% reduction. Population growth, especially in the northern region of the Quintão District, contributes to dune reduction over time, resulting in increased population exposure to flood and erosion risks. In this context, the importance of measures mitigating the impact of population growth on the dune ecosystem and consequent increase in coastal vulnerability is emphasized. Additionally, it is hoped that this study will support research focused on coastal vulnerability, particularly in locations with washouts.

Keywords: Climate Change, Urbanization, Influence of washouts

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Palmares do Sul (c), Estado do Rio Grande do Sul, Região Sul do Brasil (a).	17
Figura 2 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra com Distribuição de Sangradouros	19
Figura 3 - Fluxograma da metodologia empregada	22
Figura 4 - Sistema Laguna-Barreira	24
Figura 5 - Municípios Costeiros do RS	25
Figura 6 - Aquecimento global referente a 1850 - 1900	26
Figura 7 - Motivos de Preocupação	26
Figura 8 - Tendência de longo prazo de elevações extremas de inundação	28
Figura 9 - Erosão média em praias de diversos diâmetros de grão com subida de 1 m do nível do mar	29
Figura 10 - Proteção das dunas frente a eventos extremos	30
Figura 11 - Vulnerabilidade Costeira	34
Figura 12 - Expansão área urbana (1985-2022).....	36
Figura 13 - Avanço das dunas.....	37
Figura 14 - Perfil transversal de campo eólico.....	38
Figura 15 - Mapa de acumulado de chuva, em milímetros (mm)/Junho 2023	40

Artigo 1

Fig 1 - Location of study area in municipality of Palmares do Sul (c), state of Rio Grande do Sul (b), Southern Brazil (a).	44
Fig 2 - Washouts density in the urban area of Quintão District (A), urban washout example (b), natural washout example (a).	47
Fig 3 - Variables used in the biogeophysical exposure index. Wave (A), Surge (B), Relief (C), Wind (D), Habitats (E) and Washouts (F).	51
Fig 4 - Biogeophysical exposure index.	52
Fig 5 - Variables used in the socioeconomic exposure index. Population age (A), Population income (B) and Population density (C).	53
Fig 6 - Socioeconomic exposure index.	54
Fig 7 - Coastal Vulnerability Index.	55
Fig 8 - CVI median of points	55
Fig 9 - Correlation and concentration of indices: BEI, SEI, CVI.	58

Artigo 2

Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Palmares do Sul (c), Estado do Rio Grande do Sul(b), sul do Brasil(a).	66
Figura 2 - Composições realizadas para o ano 1985 (A) e 2022 (B).....	68
Figura 3 – Distribuição de pontos de referência.	72
Figura 4 – Mudanças das classes entre 1985 e 2022	73
Figura 5 - Mapeamento das classes para o ano 1985 (A), 1990 (B), 1995(C), 2000 (D), 2005 (E), 2010(F), 2015(G) e 2022 (H).	74
Figura 6 - Diferenciação entre as classes para cada um dos anos de análise.	75
Figura 7 - Avanços das dunas sobre as residências.	78
Figura 8 - Mapeamento das classes em um buffer de 600m da linha de costa para o ano 1985 (A), 1990 (B), 1995(C), 2000 (D), 2005 (E), 2010(F), 2015(G) e 2022 (H).	79
Figura 9 - Diferenciação entre as classes para cada um dos anos de análise relacionados a um buffer de 600m da linha de costa.	80
Figura 10 - Diferenciação entre as classes entre 1985 e 2022.....	81
Figura 11 - Mapa de persistência entre as classes entre 1985 e 2022.	82
Figura 12 - Alteração entre as classes entre 1985 e 2022.	83
Figura 13 – Gráfico de alterações da classe Duna.....	84
Figura 14 – Gráfico de alterações da classe Urbano.....	84
Figura 15 – Gráfico de alterações da classe Outra classe	84
Figura 16 – Gráfico de alterações da classe Silvicultura	85

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Tipos de riscos e suas características.....	31
--	----

Artigo 1

Table 1 - Coastal Vulnerability Index (CVI).....	50
Table 2 - Correlation between the BEI, SEI and VCI indices.....	57

Artigo 2

Quadro 1 - Imagens de satélites utilizados.....	67
Quadro 2 - Chave de interpretação	70
Quadro 3 - Diferenciação entre as classes (Total)	73
Quadro 4 - Diferenciação entre as classes (600m)	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEI	Biogeophysical Exposure Index
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite
CVI	Coastal Vulnerability Index
GIS	Geographic Information System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEB	Índice de Exposição Biogeofísica
IES	Índice de Exposição Socioeconômica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVC	Índice de Vulnerabilidade Costeira
LANDSA	Land Remote Sensing Satellite
LCM	Land Change Modeler
PPGSR	Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
RS	Rio Grande do Sul
SEI	Socioeconomic Exposure Index
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Área de Estudo	17
1.2	Hipótese	20
1.3	Objetivo	20
1.3.1	<i>Objetivos específicos</i>	20
2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
3	REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1	Zonas Costeiras	23
3.2	Mudanças Climáticas relacionadas às zonas costeiras	25
3.3	Serviços ecossistêmicos das dunas voltados à proteção costeira.....	29
3.4	Vulnerabilidade costeira	30
3.5	Mudança de uso e cobertura da terra.....	35
3.6	Relação entre dunas e sangradouros	38
4	DESENVOLVIMENTO	40
4.1	ARTIGO 1 - Integrating New Data for Coastal Vulnerability Assessment: Case Study in Quintão, RS, Brazil	40
4.2	ARTIGO 2 - Análise temporal de mudanças no ecossistema de dunas do distrito de Quintão, Palmares do Sul /RS	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	FINANCIAMENTO	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, acentuadas pela ação antrópica, são uma realidade na atualidade, em todo o mundo. Afetam diretamente o ambiente costeiro, devido aos seus efeitos, como a elevação relativa do nível médio do mar e o aumento da frequência de eventos extremos. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (IPCC, 2022) fornece uma revisão da literatura sobre os impactos, adaptação e vulnerabilidade às mudanças climáticas em todo o mundo. O relatório destaca a vulnerabilidade costeira como um dos principais impactos das mudanças climáticas. Dentre as diversas definições propostas de vulnerabilidade, o IPCC define o termo como “a propensão ou predisposição de um sistema a ser afetado adversamente, contendo uma variedade de conceitos e elementos, como a sensibilidade ou suscetibilidade a danos e também a falta de capacidade para enfrentar ou se adaptar” (IPCC, 2022).

Diante desse cenário de mudanças climáticas e de vulnerabilidade crescente do ambiente costeiro, a necessidade de diagnóstico e gestão sustentável das zonas costeiras é ainda mais urgente. Nesse contexto, o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), promulgado através da Lei nº 7.661 de 16 de maio de 1988, define a Zona Costeira como “o espaço geográfico de interação do ar, do mar e da terra, incluindo seus recursos renováveis ou não, abrangendo uma faixa marítima e outra terrestre” (BRASIL, 1988).

Em consonância com essas necessidades, o atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil (IBGE, 2011), o mais recente disponibilizado até então, revela que uma significativa parcela da população brasileira, aproximadamente 26,58%, reside em municípios localizados na zona costeira. Esse percentual corresponde a mais de 50 milhões de habitantes, destacando a importância não apenas ambiental, mas também socioeconômica, da gestão adequada dessas áreas.

Assim como no Brasil, o crescimento demográfico histórico nas áreas costeiras tem suscitado uma pressão crescente sobre os ecossistemas naturais em todo o mundo, como documentado por estudos anteriores (MORAES, 1999; REIS et al., 2002, BARRAGAN & ANDRÉS, 2015). Tais áreas, devido à localização geográfica e características ambientais, constituem ambientes particularmente sensíveis. Sob a perspectiva física, notadamente devido à dinâmica constante resultante de processos

erosivos e deposicionais de sedimentos e, do ponto de vista ecossistêmico, o aumento da pressão antrópica sobre esses ambientes culmina na depleção de habitats cruciais.

Na costa brasileira, os maiores problemas estão relacionados com a ocupação desordenada do solo e exploração de recursos naturais através de atividades humanas, resultando em impactos como a diminuição da biodiversidade, contaminação hídrica causadas pela falta de saneamento adequado e erosão costeira (SCHERER et al., 2010). No âmbito socioeconômico, os impactos estão relacionados a perdas humanas e materiais, especialmente ligadas a desastres causados por ocupações em áreas de risco, falta de saneamento adequado, entre outros (SCHERER et al., 2010) .

Inseridos nesse contexto, os ecossistemas costeiros desempenham um papel crucial ao oferecer benefícios para o meio ambiente e para a população, denominados serviços ecossistêmicos, conforme definido por Daily (1997). Esses serviços representam condições e processos pelos quais os ecossistemas naturais, juntamente com as espécies que os compõem, sustentam e satisfazem a vida humana.

Um exemplo notório desses serviços é o papel desempenhado pelas dunas, que atuam como barreiras naturais de proteção contra o avanço do mar e processos de erosão costeira, além de reduzirem a exposição a eventos de inundação da população residente próxima à costa (ALEXANDRAKIS et al., 2015; LANDRYA et al., 2020). Contudo, esses ecossistemas dunares enfrentam ameaças consideráveis, incluindo a ocupação urbana desordenada, frequentemente observada sobre as dunas.

A falta de planejamento de infraestrutura urbana e a drenagem ineficiente contribuem para o surgimento de interrupções na costa, denominadas de sangradouros. Essas feições, presentes em toda a Zona Costeira do Rio Grande do Sul, são responsáveis pela interrupção da continuidade dos cordões de dunas, influenciando diretamente na redução das dunas frontais e contribuindo para o aumento da vulnerabilidade da costa a eventos de inundação.

É relevante notar que a presença de sangradouros é mais prevalente no litoral sul do Brasil em comparação com outras regiões costeiras ao redor do mundo, conforme enfatizado por Calliari & Figueiredo (2005). Além disso, de acordo com Calliari & Figueiredo (2005), o aumento na quantidade de sangradouros em áreas urbanas pode resultar em déficits sedimentares praias e erosão costeira, considerando o maior transporte de sedimentos em direção à zona de arrebentação.

Nesse sentido, realizar a análise e o diagnóstico da vulnerabilidade costeira para essas regiões, que apresentam campos dunares interrompidos por sangradouros, torna-se um desafio significativo. Os modelos atualmente empregados para tais análises incorporam diversos parâmetros físicos, como geomorfologia, relevo, incidência de ventos, direção de ondas e informações associadas aos ecossistemas, incluindo a presença de dunas como o modelo *Coastal Vulnerability Model* do software InVEST (INVEST, 2024). Algumas abordagens presentes na literatura propõem adaptações nos índices de vulnerabilidade, incorporando dados socioeconômicos para uma composição mais abrangente (NICOLODI E PETERMANN, 2010; SFREDDO, DA SILVA E BARBOZA, 2023). Entretanto, observa-se a ausência de metodologias que considerem os sangradouros como um fator de importância na formulação do Índice de Vulnerabilidade Costeira.

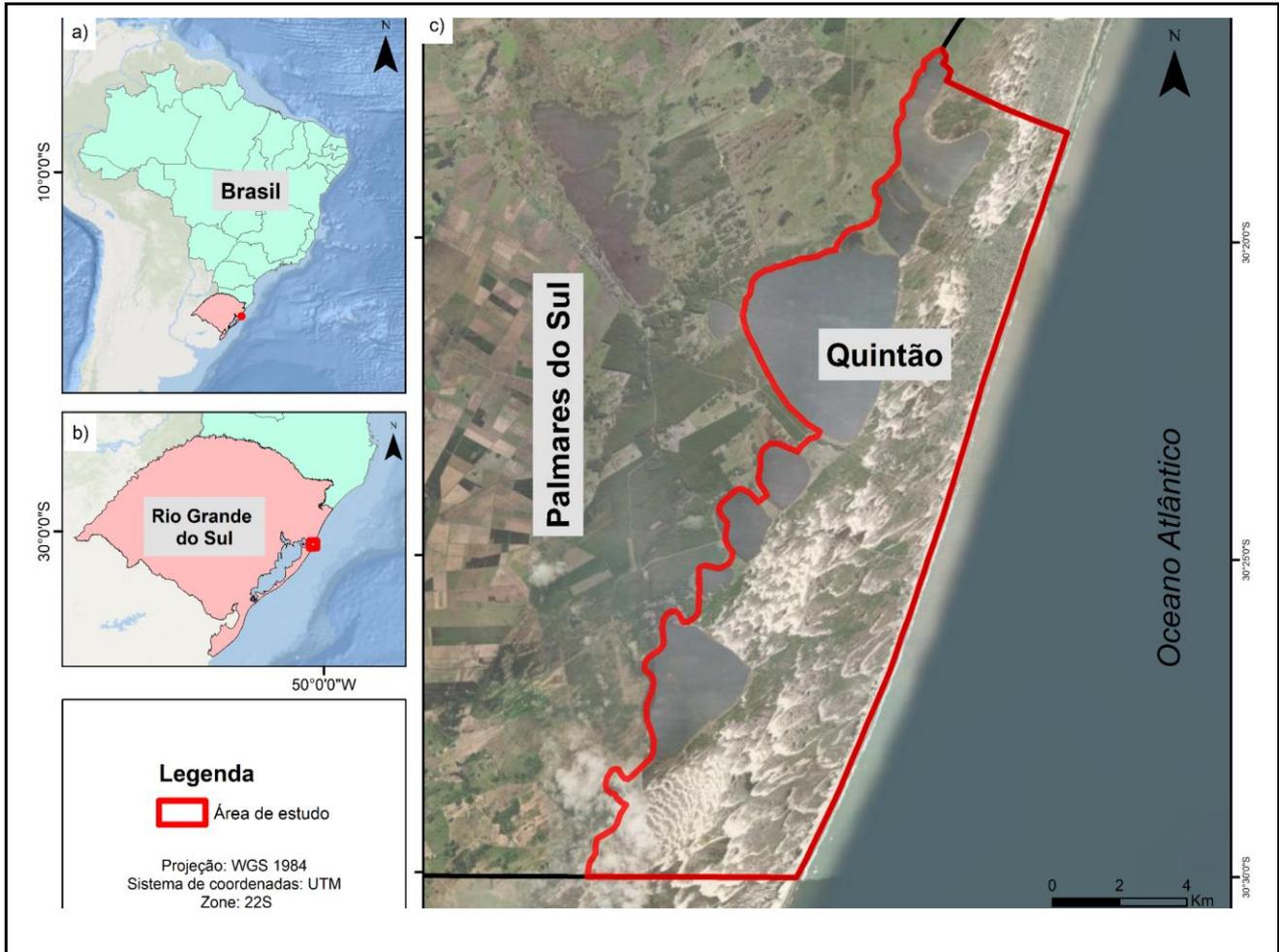
Para suprir essa lacuna, é importante propor um Índice de Vulnerabilidade Costeira inovador em um contexto predominantemente caracterizado por ecossistemas dunares interrompidos por sangradouros. Nesse contexto, este estudo propõe a incorporação de dados biogeofísicos e socioeconômicos, juntamente com a inclusão de informações referentes à densidade de sangradouros. Adicionalmente, a compreensão da dinâmica de alteração do ecossistema de dunas ao longo do tempo proporciona uma análise mais abrangente da vulnerabilidade costeira e dos fatores que contribuem para o aumento ou redução do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC).

1.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende o distrito costeiro de Quintão, município de Palmares do Sul, situado no litoral médio do Rio Grande do Sul (Figura 1).

O distrito de Quintão tem uma área de 141,17 km², está localizado na bacia hidrográfica do rio Tramandaí. Em relação à geologia, o distrito está inserido na unidade geológica “coberturas eólicas holocênicas”, caracterizada pela presença de dunas (RAMGRAB et al., 2004).

Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Palmares do Sul (c), Estado do Rio Grande do Sul, Região Sul do Brasil (a).



Fonte: Elaboração própria

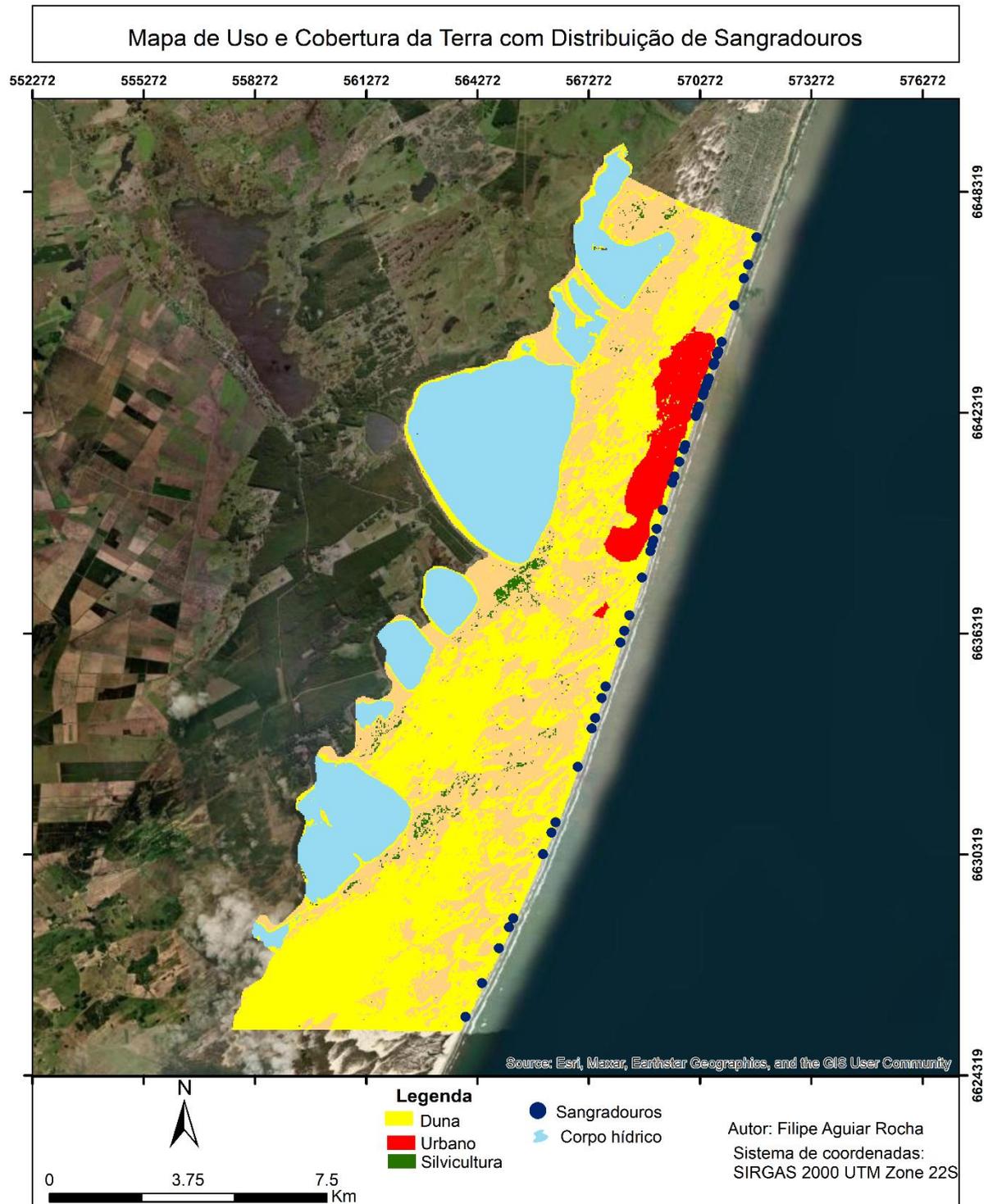
O clima, de acordo com Rossato (2011), no Litoral Médio, é caracterizado por ser do tipo subtropical II, com maior influência de sistemas polares e interferência tropical marítima, com temperatura média anual variando entre 17 e 20° C.

A população estimada da área total do distrito de Quintão é de 3069 habitantes, conforme o último Relatório Base de informações do Censo Demográfico dos Resultados do Universo por Setor Censitário, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012).

O Distrito de Quintão, localizado no município de Palmares do Sul, foi escolhido como área de estudo devido à diversidade de uso e cobertura da terra, com setores bem definidos e distintos, com presença de silvicultura, área urbana, dunas altas e dunas baixas, assim como a presença de sangradouros (Figura 2). A variedade de uso e cobertura da terra e a presença de sangradouros no distrito de Quintão permite a replicação do modelo gerado em

outras áreas no sul do Brasil, especialmente aquelas que contam com a presença de sangradouros ao longo da linha de costa.

Figura 2 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra com Distribuição de Sangradouros



1.2 Hipótese

A hipótese investigada neste trabalho é a viabilidade de adaptar índices de vulnerabilidade costeira existentes, compostos por dados socioeconômicos e biofísicos, de forma a incluir dados relacionados à ocorrência de sangradouros, de maneira a melhor refletir a vulnerabilidade costeira em regiões onde predominam campos dunares, interrompidos por sangradouros.

Adicionalmente, a pesquisa investiga que o aumento da urbanização sobre o ecossistema de dunas no distrito de Quintão contribui para a diminuição desse habitat, o que conseqüentemente, aumenta a vulnerabilidade costeira em relação aos fenômenos de erosão e inundação, tornando as áreas urbanas mais propensas a danos e prejuízos associados às alterações climáticas.

1.3 Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um Índice de Vulnerabilidade Costeira, integrando dados socioeconômicos e biofísicos, que busca preencher uma lacuna existente através da inserção de informações relacionadas à densidade de sangradouros, com o propósito de proporcionar uma avaliação abrangente e aprimorada da vulnerabilidade costeira. Além disso, objetiva-se realizar uma análise espacial temporal de mudanças no ecossistema de dunas a fim de identificar as atividades antrópicas que contribuem para a redução das dunas e para o aumento de vulnerabilidade costeira.

1.3.1 Objetivos específicos

- Mapear a presença de sangradouros na Zona Costeira do Rio Grande do Sul e seu impacto na interrupção dos cordões de dunas, influenciando diretamente na vulnerabilidade costeira.
- Desenvolver um Índice de Vulnerabilidade Costeira inovador, integrando dados biogeofísicos e socioeconômicos, incluindo informações sobre a densidade de sangradouros, para proporcionar uma avaliação mais abrangente da vulnerabilidade costeira.
- Realizar uma análise espacial temporal das mudanças no ecossistema de dunas no distrito de Quintão, identificando as atividades antrópicas que contribuem para a diminuição das dunas e o aumento da vulnerabilidade costeira.

2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo está organizado em duas seções principais, a primeira trata-se do referencial teórico contendo os conceitos e assuntos abordados no desenvolvimento da pesquisa e na elaboração da dissertação, e a segunda seção, trata-se do desenvolvimento da dissertação, através de dois artigos intitulados:

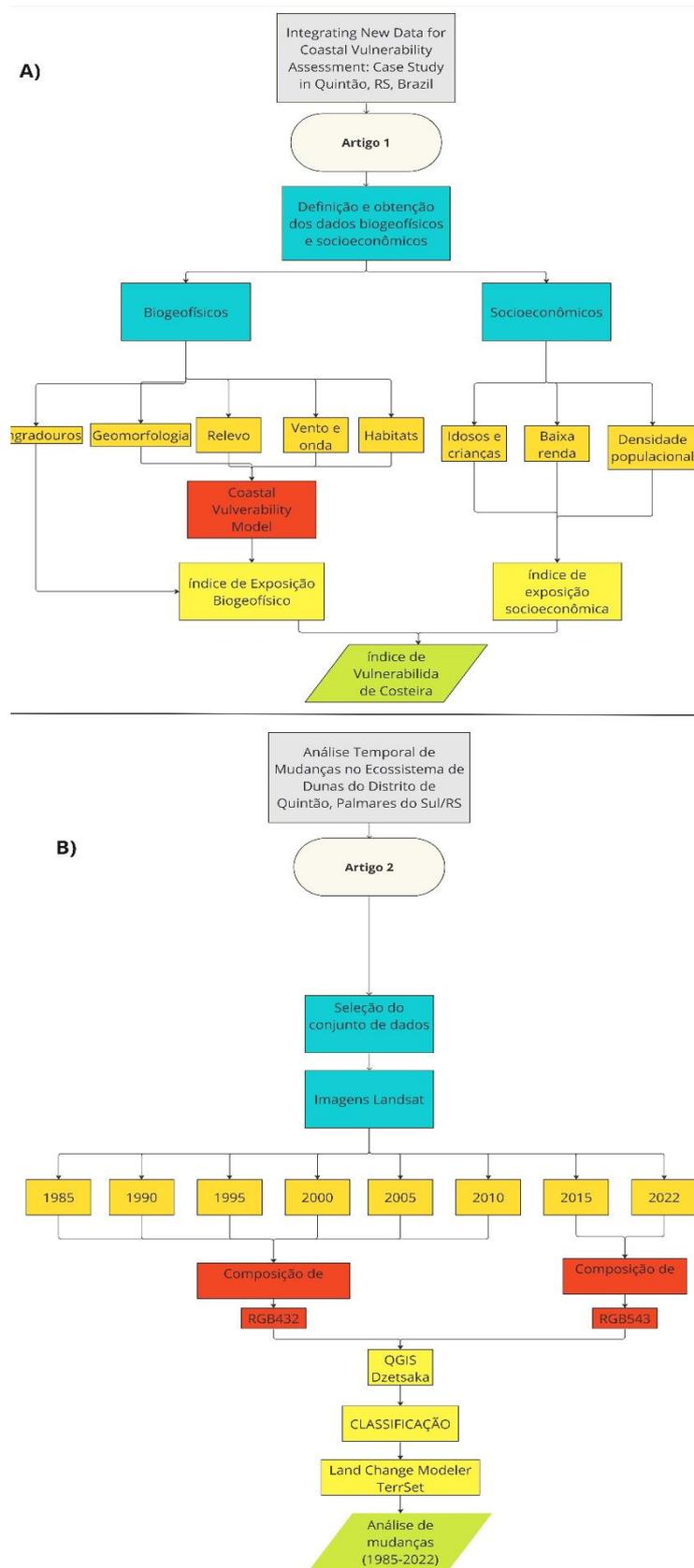
- *Integrating New Data for Coastal Vulnerability Assessment: Case Study in Quintão, RS, Brazil*

- Análise Temporal de Mudanças no Ecossistema de Dunas do Distrito de Quintão, Palmares do Sul/RS

A formatação dos artigos segue as instruções das revistas em que foram submetidos.

A metodologia dos artigos está ilustrada através do fluxograma da Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia empregada



3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo objetiva apresentar uma fundamentação conceitual voltada para a temática de análise, com foco nas zonas costeiras, mudanças climáticas, serviços ecossistêmicos das dunas, vulnerabilidade costeira e mudanças de uso e cobertura da terra em ambientes costeiros.

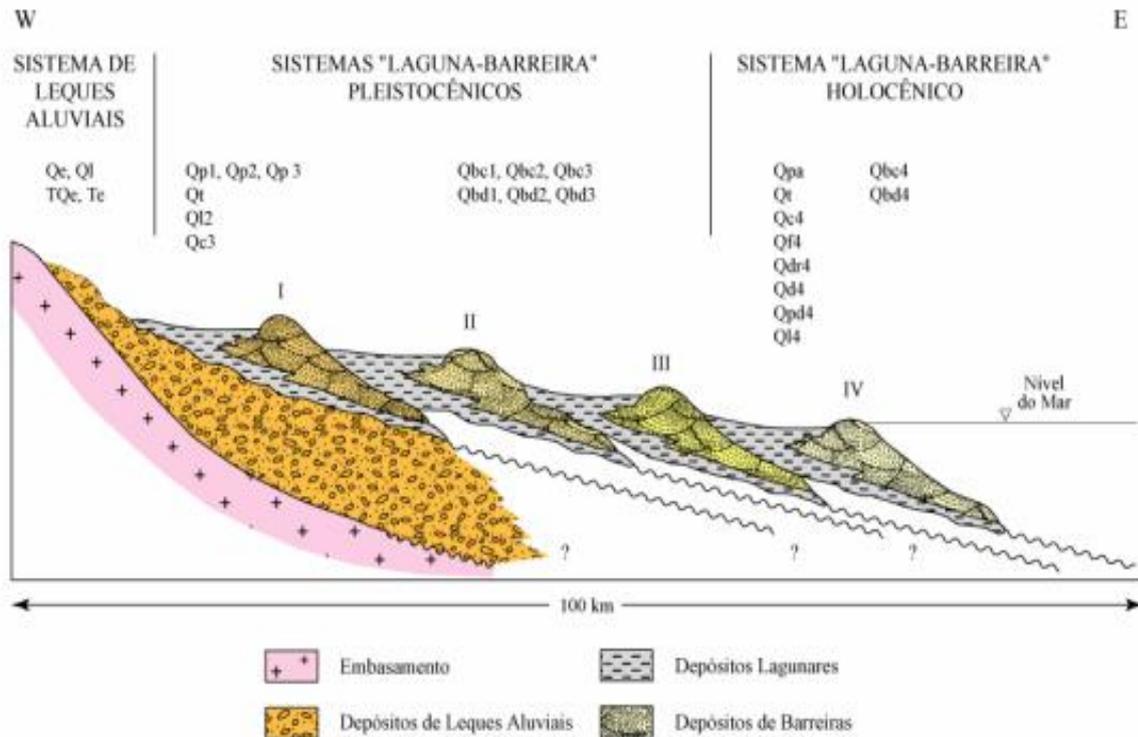
3.1 Zonas Costeiras

De acordo com a Lei 7.661, que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (BRASIL, 1988), considera-se Zona Costeira “o espaço geográfico de interação do ar, do mar e da terra, incluindo seus recursos renováveis ou não, abrangendo uma faixa marítima e outra terrestre”.

Ao longo das últimas décadas, em decorrência do crescimento exponencial da urbanização em zonas costeiras, observou-se um aumento significativo das atividades antrópicas sobre os ambientes naturais. Essa expansão urbana resultou em modificações substanciais nos ecossistemas costeiros, refletindo em transformações ambientais e impactos notáveis sobre a biodiversidade e os processos naturais dessas áreas.

Especialmente no Rio Grande do Sul, a zona costeira foi formada devido aos processos sucessivos de regressões e transgressões marinhas, formando os chamados sistemas Laguna-Barreira. A configuração atual da zona costeira corresponde à última transgressão marinha e é datada da época do Holoceno do período Quaternário. Na Figura 4, se observa uma ilustração do Sistema Laguna-Barreira (TOMAZELLI e VILLWOCK, 2005).

Figura 4 - Sistema Laguna-Barreira

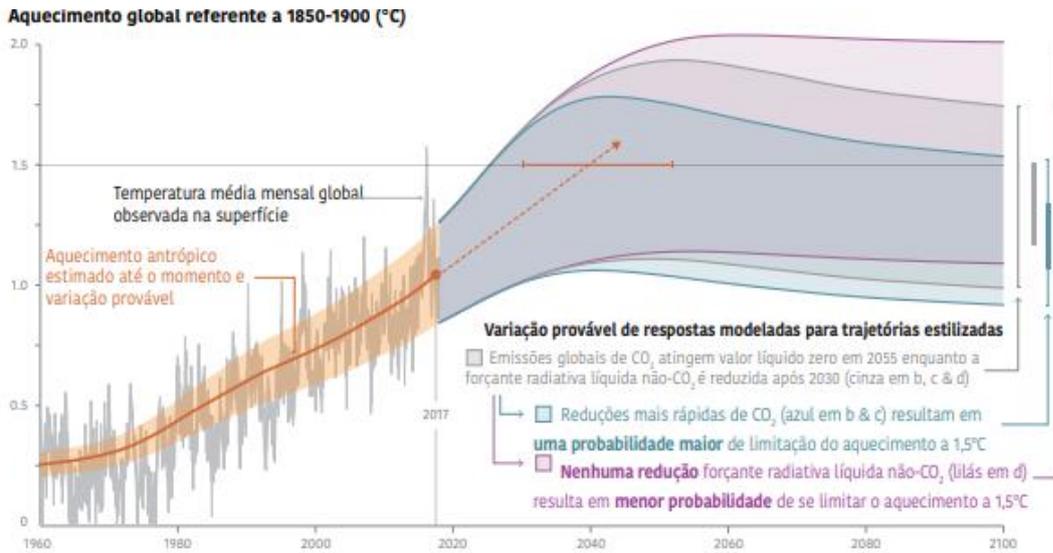


Fonte: Tomazelli e Villwock (2005)

Referente a barreira Holocênica ou Laguna Barreira IV, segundo Tomazelli & Villwock (2005) “corresponde ao mais recente sistema deposicional do tipo Laguna Barreira, sendo desenvolvida durante o holoceno como consequência da transgressão, com o nível do mar entre 3 e 4 metros mais elevados do que ao observado atualmente.” Ainda, segundo Tomazelli & Villwock (2005), “o campo de dunas eólicas presentes na barreira IV é bem desenvolvida com uma variação de largura entre 2 e 8 km estendendo-se ao longo da costa”.

A zona costeira do RS, de acordo com o Plano de Gerenciamento Costeiro - GERCO/RS está dividida em três setores, sendo eles, litoral norte, litoral médio ao leste e oeste da lagoa dos patos e litoral sul, conforme Figura 5.

Figura 6 - Aquecimento global referente a 1850 - 1900



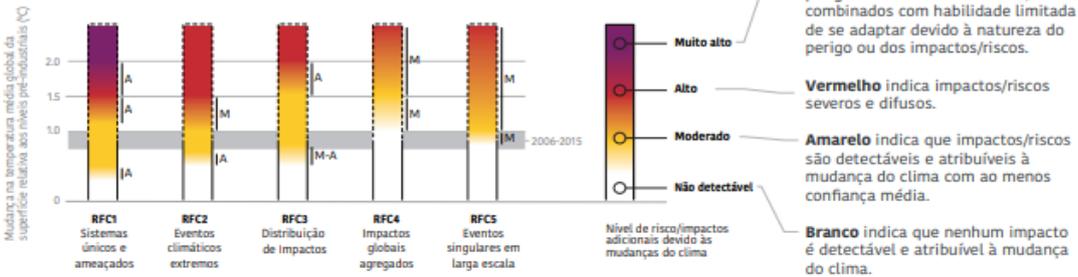
Fonte: IPCC (2018)

Segundo o IPCC (2018), existem cinco motivos de preocupação relacionados aos impactos e riscos das mudanças climáticas conforme Figura 7.

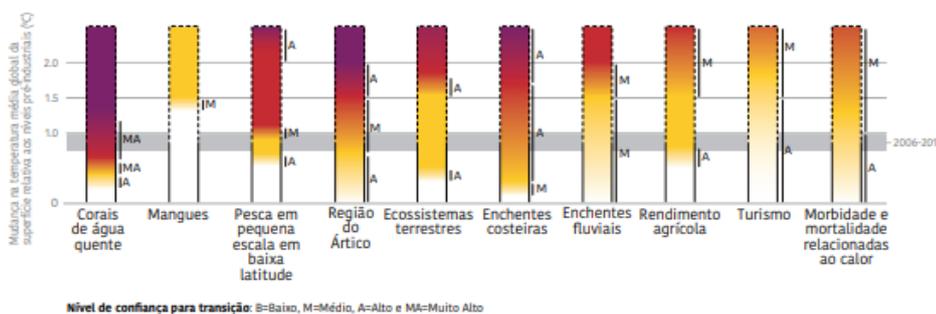
Figura 7 - Motivos de Preocupação

Cinco Motivos de Preocupação (RFCs) ilustram os impactos e riscos de níveis diferentes de aquecimento global para pessoas, economias e ecossistemas através de setores e regiões.

Impactos e riscos associados aos Motivos de Preocupação (RFCs)



Impactos e riscos aos sistemas naturais, manejados e humanos selecionados



Fonte: IPCC (2018)

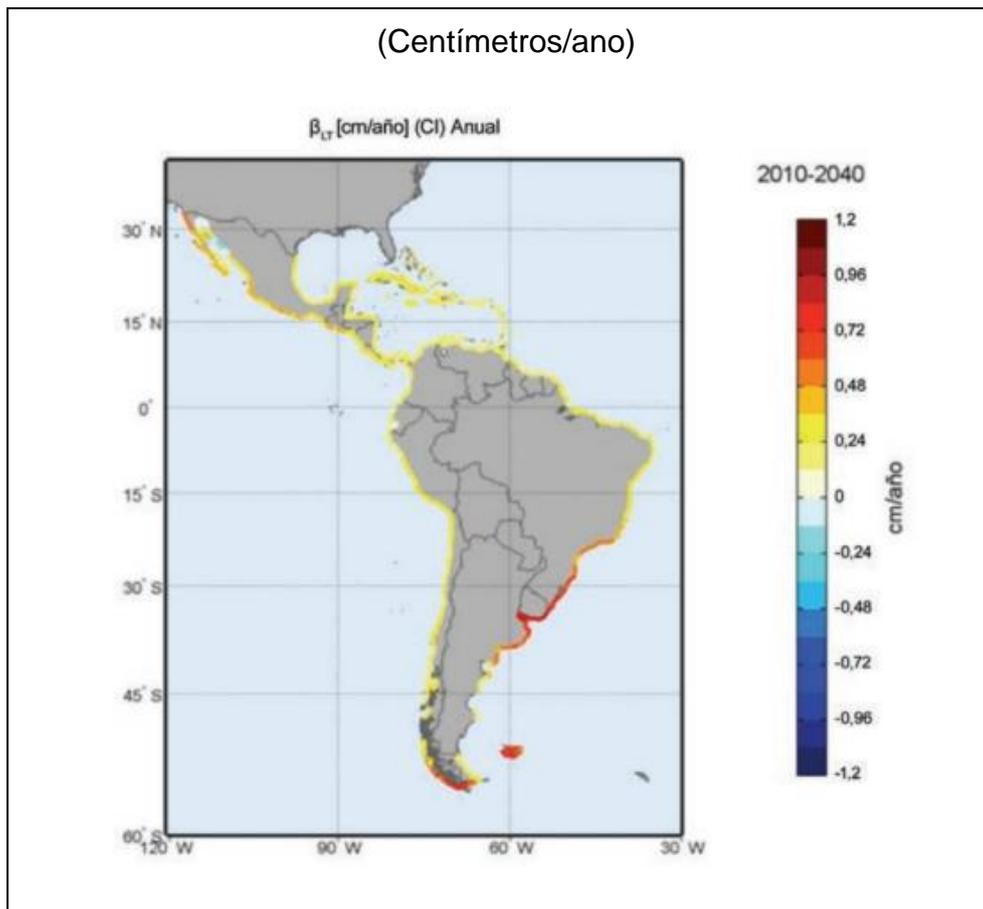
São observados diferentes tipos de impactos e riscos relacionados ao aquecimento global. Para a zona costeira, destaca-se os riscos aos ecossistemas terrestres e enchentes costeiras e o aumento de eventos climáticos extremos descrito como “riscos/impactos à saúde humana, meios de subsistência, bens e ecossistemas causados por eventos climáticos extremos, tais como ondas de calor, chuvas intensas, secas e incêndios florestais associados e inundações costeiras” (IPCC, 2018).

A elevação do nível médio do mar e o aumento da frequência de eventos extremos são alguns dos efeitos das mudanças climáticas que afetam as zonas costeiras. Segundo a REDECLIMA-FURG (2013):

As Zonas Costeiras estão, portanto, entre as áreas mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas globais, pois serão atingidas diretamente pelo aumento do nível médio do mar, pela exposição a eventos extremos de tempestade, pelas mudanças nos regimes de descarga fluvial dos rios, pela elevação da temperatura superficial do mar, pela acidificação dos oceanos, dentre outros eventos (REDECLIMA-FURG,2013).

CEPAL et al. (2012), através do estudo sobre efeitos das mudanças climáticas na costa da América Latina e no Caribe, apontaram localidades que seriam afetadas pelas mudanças climáticas. Ao analisar o trabalho, foi possível observar os parâmetros para o Brasil e Rio Grande do Sul. Em relação à tendência a longo prazo de elevações máximas da cota de inundação, a região sul do Brasil, especialmente o Rio Grande do Sul, conta com os maiores índices em relação a todo o Brasil e parte da América Latina (Figura 8).

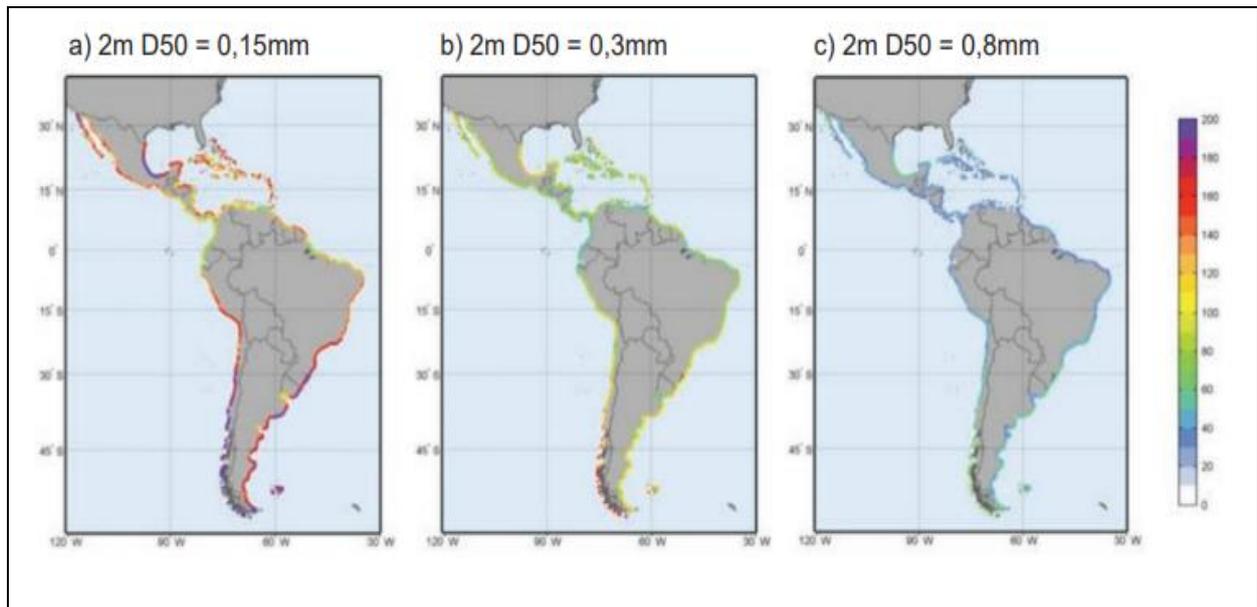
Figura 8 - Tendência de longo prazo de elevações extremas de inundação



Fonte: CEPAL et al. (2012)

Ainda, segundo CEPAL et al. (2012), em relação a Erosão Média, levando em conta os diferentes diâmetros de grãos com a subida do nível do mar de 2m, o Rio Grande do Sul contaria com os maiores índices comparados com o restante do Brasil, especialmente quando relacionado aos menores diâmetros de grãos (Figura 9).

Figura 9 - Erosão média em praias de diversos diâmetros de grão com subida de 1 m do nível do mar



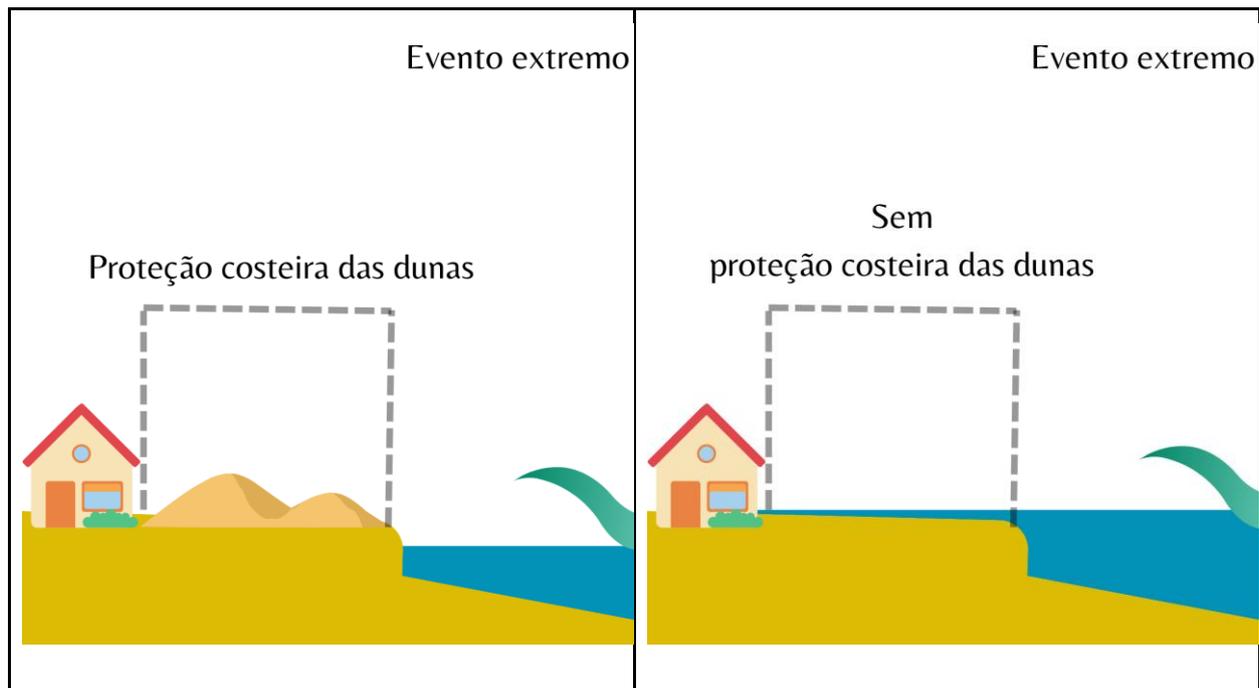
Fonte: CEPAL et al. (2012)

É notável que os eventos climáticos extremos, como ciclones e tempestades, representam desafios significativos para as áreas costeiras, tornando a proteção dessas regiões uma prioridade em face das mudanças climáticas. Estudos, como o de Ngye et al. (2016), ressaltam a importância das dunas costeiras como elementos fundamentais no controle da exposição costeira e na proteção contra os efeitos adversos desses eventos extremos. Tais eventos interferem nas taxas de pluviosidade, causando seu aumento, e agravando os efeitos da maré meteorológica. Nesse sentido, as dunas servem de barreira natural contra a inundação e a erosão costeira, minimizando os impactos devastadores desses eventos climáticos.

3.3 Serviços ecossistêmicos das dunas voltados à proteção costeira

Além da beleza da paisagem costeira contrastando com o mar, as dunas oferecem diferentes benefícios para a população costeira. Em um cenário de mudanças climáticas, constituem a principal barreira natural de proteção da população residente contra o avanço do mar e inundações (Figura 10).

Figura 10 - Proteção das dunas frente a eventos extremos



Fonte: Elaboração própria

Segundo Carter et. al (1990), “as dunas costeiras enfrentam crescentes ameaças das atividades humanas, resultando em perda de diversidade geomorfológica, ecológica, entre outros impactos”. Com o avanço da urbanização e atividades antrópicas nas zonas costeiras, aumentam as pressões sobre as dunas e a redução do ecossistema e sua capacidade de fornecer proteção. Em relação às dunas costeiras, segundo Portz (2008), “sua formação e vegetação natural, são essenciais para as praias arenosas servindo de proteção contra a ação de ressacas e ondas de tempestades”. Segundo Carter et. al (1990) “Atualmente as dunas são facilmente alteradas por humanos, sendo destruídas por usos concorrentes em suas áreas”. Com as mudanças climáticas e o aumento de eventos extremos são necessárias pesquisas voltadas à análise das alterações das dunas ao longo do tempo a fim de identificar atividades e processos de alteração e pressão que diminuam a capacidade das dunas de realizar a proteção da população frente aos riscos.

3.4 Vulnerabilidade costeira

A respeito da vulnerabilidade costeira, segundo a conceituação de Gornitz (1991), esse termo refere-se à suscetibilidade da costa em reagir adversamente aos perigos provenientes do ambiente costeiro. Entre os perigos, destacam-se os eventos de inundação, erosão, e a elevação do nível relativo do mar.

Segundo a *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC), “os riscos costeiros são divididos em dois tipos, de acordo com seus impactos nas zonas costeiras, sendo eles os riscos com ocorrência rápida, ou seja, eventos como tsunamis, marés de tempestades e ondas extremas causadas por ventos fortes e o segundo tipo relacionado aos riscos que ocorrem de forma progressiva ao longo do tempo chamados de riscos contínuos, como por exemplo o aumento relativo do nível do mar e erosão costeira” (IOC, 2009). O Quadro 1 expõe os tipos de riscos e suas características.

Quadro 1 - Tipos de riscos e suas características

PERIGO		DEFINIÇÃO
RISCOS DE OCORRÊNCIA RÁPIDA	TSUNAMI	Uma série de ondas oceânicas geradas pelo deslocamento do fundo do oceano devido a um terremoto, deslizamento de terra por evento vulcânico (incluindo deslizamento de terra submarino) ou grande impacto de asteroide.
	TEMPESTADE	Um aumento temporário no nível do mar causado por uma tempestade intensa e a baixa pressão barométrica associada e fortes ventos em terra.
	ONDAS EXTREMAS CAUSADAS POR VENTOS FORTES	Situações extremas de ondas (estado do mar) geradas por ventos em algum lugar do oceano, seja localmente ou a milhares de quilômetros de distância.
	ELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR A LONGO PRAZO	Elevação global do nível do mar devido à expansão térmica dos oceanos e ao aumento do derretimento do gelo terrestre.
		Uma perda de terra costeira, causada pela ação das ondas,

RISCO DE CONTÍNUOS	EROSÃO COSTEIRA	correntes de maré, correntes de onda ou drenagem que pode ser intensificada por cada um dos outros perigos.
--------------------	-----------------	---

Fonte: IOC (2009)

Conforme descrito pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2001), a vulnerabilidade pode ser caracterizada como o grau em que um sistema é suscetível a efeitos adversos decorrentes das mudanças climáticas ou sua incapacidade de enfrentar esses impactos. Portanto, o IPCC inclui o componente "mudança climática" ao avaliar a vulnerabilidade costeira. De acordo com o IPCC (2001) uma região exposta a uma alta vulnerabilidade costeira é aquela com menor capacidade de se adaptar diante das mudanças climáticas. Visto que a vulnerabilidade é avaliada com base no caráter, na magnitude e na taxa de mudança climática às quais um sistema está sujeito, além de levar em consideração sua sensibilidade e capacidade de adaptação.

Marengo et. al (2003) elaboraram uma síntese do terceiro relatório do IPCC 2001, segundo os autores:

Os resultados das avaliações globais do TAR do GT2 do IPCC (IPCC 2000, 2001) sobre impactos, adaptação e vulnerabilidade às mudanças climáticas em nível regional podem se resumir assim:

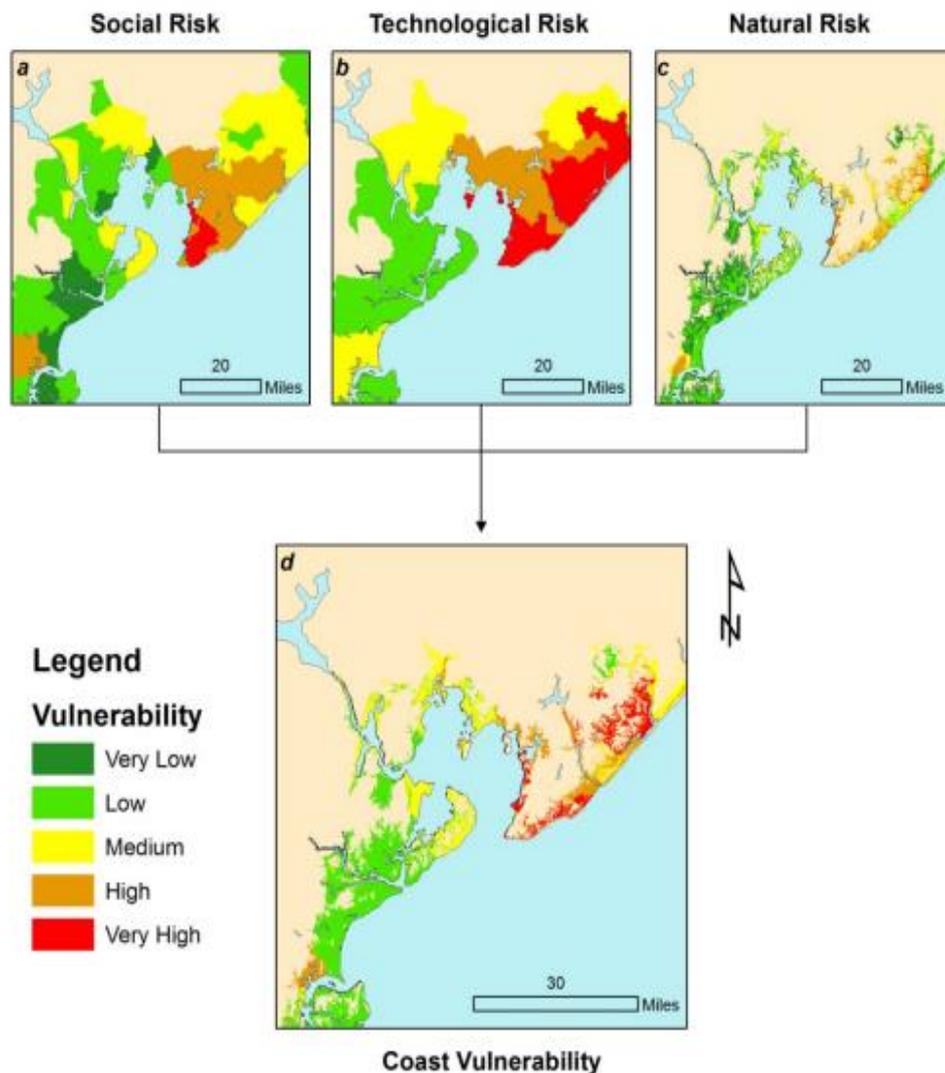
- a) As recentes mudanças climáticas, especialmente o aumento da temperatura já estão afetando sistemas físicos (Hidrologia, recursos hídricos) e biológicos (ecossistemas, saúde humana, cidades, indústrias).
- b) Existem indicadores preliminares de que alguns sistemas humanos já tenham sido afetados pela seca ou enchentes.
- c) Os Sistemas naturais são vulneráveis a mudanças climáticas, e alguns serão prejudicados irreversivelmente.
- d) Aqueles com menos recursos e que têm menor capacidade de se adaptar são os mais vulneráveis. (MARENGO et. al, 2003).

Ao analisar os resultados, especialmente os itens c e d, destacados por Marengo et. al (2003) podemos observar que, de acordo com o IPCC, alguns sistemas naturais serão afetados a ponto de “não retorno”, ou seja, não será possível a sua recuperação. Podemos associar com os ecossistemas de dunas, que são afetados por eventos extremos acentuados pelas mudanças climáticas, além da expansão urbana sobre o ecossistema que acarretam na constrição costeira, conhecida em inglês por “*coastal squeeze*”, fenômeno que pode ser definido como a perda de habitats naturais ou a degradação de sua qualidade, resultantes de ações humanas que interferem no avanço natural desses habitats em direção à terra, que aconteceria naturalmente em resposta ao aumento do nível do mar, juntamente com outros processos costeiros. (PONTEE et al., 2021). Em relação ao item d, tem-se que a população com menos recurso são mais vulneráveis por conta da falta de capacidade adaptativa, revelando a importância da inserção de dados socioeconômicos na elaboração do índice de vulnerabilidade costeira.

Os modelos comumente utilizados para a geração de um Índice de Vulnerabilidade Costeira são geralmente desenvolvidos com foco na análise de dados biofísicos. Um exemplo notório é o Coastal Vulnerability Model do Natural Caption Project, proposto pela Universidade de Stanford, que não leva em conta dados socioeconômicos. Neste contexto, observa-se que alguns modelos têm sido adaptados para incorporar variáveis de natureza social (SFREDDO et al., 2023; NICOLODI e PETERMANN, 2010), permitindo, desse modo, a integração de dados tanto biofísicos quanto socioeconômicos.

Em escala nacional, o estudo realizado por Nicolodi & Petermann (2010), contou com a utilização de aspectos ambientais, sociais e tecnológicos para a elaboração do IVC conforme Figura 11.

Figura 11 - Vulnerabilidade Costeira



Nota: O cruzamento espacial feito entre os três tipos de risco: (a) Risco Natural; (b) Risco Social; e (c) Risco Tecnológico. O resultado é mostrado por (d) Vulnerabilidade da costa, obtida por média simples.

Fonte: NICOLODI & PETERMANN (2010)

Em nível regional, especialmente no sul do Brasil, Sfreddo, da Silva e Barboza (2023) realizaram uma avaliação de vulnerabilidade costeira para o município de Jaguaruna, localizado no litoral de Santa Catarina. Os autores utilizaram análise de dados biogeofísicos e socioeconômicos do município para a análise de vulnerabilidade costeira utilizando dados do InVEST e Censitários, os resultados apresentados mostram que o setor censitário de maior vulnerabilidade costeira apresenta alta exposição tanto na exposição biogeofísica, quanto na exposição socioeconômica. Nessa área de estudo, os autores relatam a presença de construções em dunas, problema recorrente no litoral sul do Brasil.

Para esse trabalho, adotaremos o conceito de vulnerabilidade costeira relacionado com a propensão da população ser afetada por eventos e riscos costeiros, através da relação entre variáveis biogeofísicas e socioeconômicas. Essas últimas, quando a população está inserida em um contexto de desigualdades sociais e/ou dificuldade de locomoção, podem diminuir a capacidade adaptativa da população residente a enfrentar os riscos.

3.5 Mudança de uso e cobertura da terra

Considerando o contexto histórico, as áreas costeiras enfrentam um aumento exponencial das atividades humanas em seus ambientes, resultando na exploração dos recursos disponíveis, aumento do tráfego de veículos e na poluição e descarte de resíduos que impactam diretamente o ecossistema costeiro, com alta relevância ecológica (ROCHA, 2022).

Segundo Parthasarathy & Natesan (2015), “estima-se que cerca de 44% da população mundial viva a uma distância inferior a 100 km das zonas costeiras. O rápido processo de desenvolvimento tem exercido inúmeras pressões, tanto diretas quanto indiretas, sobre os ecossistemas costeiros, resultando em sua deterioração e degradação.” Ainda, segundo os autores, “os ecossistemas costeiros enfrentam significativos danos decorrentes dos efeitos diretos e indiretos associados ao crescimento populacional, transformações econômicas e mudanças substanciais no uso do solo” (PARTHASARATHY & NATESAN, 2015).

De acordo com o Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil (IBGE, 2011), 26,58% da população brasileira vive na Zona Costeira, representando mais de 50 milhões de pessoas.

O aumento exponencial da urbanização nas zonas costeiras acarreta no risco de degradação dos ecossistemas naturais que compõem esses ambientes. Nesse sentido, diversos trabalhos analisaram as mudanças de uso e cobertura da terra nas zonas costeiras no Brasil. Os autores Serra e Farias Filho (2019) realizaram uma avaliação da expansão urbana e dos impactos ambientais na Zona Costeira Norte do município de São Luís (MA). Para isso, utilizaram a classificação digital supervisionada, empregando o algoritmo MaxVer, com base em imagens do satélite Landsat TM5 dos anos 1984 e 2010. Segundo os autores, “os resultados mostraram que houve significativa redução da área com vegetação em consequência do intenso processo de expansão urbana, em 1984 a área urbana ocupava

um total de 29,27% da área e em 2010 ocupava um total de 56,26%.” (SERRA e FARIAS FILHO, 2019).

Figura 12 - Expansão área urbana (1985-2022)

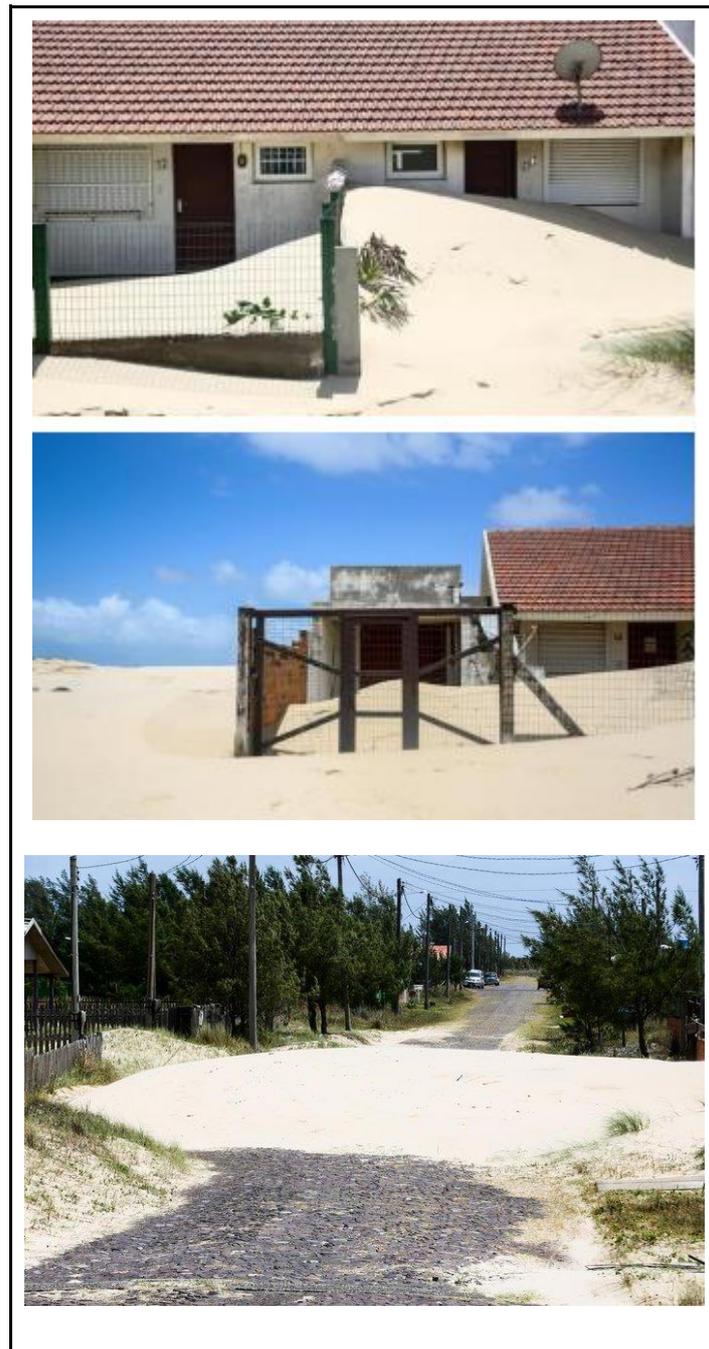


Fonte: Google Earth (2023)

Em relação ao Distrito de Quintão, Rocha (2022) através de técnicas de classificação de imagem de satélite por interpretação visual, realizou uma análise temporal das alterações antrópicas e seus impactos no sistema de dunas do distrito entre os anos de 2002 e 2022. Imagens do Google Earth mostram o exponencial crescimento urbano no distrito de Quintão entre 1985 e 2021, podendo até mesmo observar-se a expansão urbana sobre as dunas

(Figura 12). Foram identificadas como classes de impactos o uso urbano e a silvicultura. Como resultado observou-se um aumento de 334,55% da área das classes de impacto durante o período de análise. Em relação a expansão urbana observou-se um aumento de 57,88% de sua área durante o período de análise (ROCHA, 2022). Devido à dinâmica de distribuição das dunas móveis é possível observar o soterramento de residências e estruturas (Figura 13).

Figura 13 - Avanço das dunas



Fonte: Marco Favero/GZH-Agência RBS (2020)

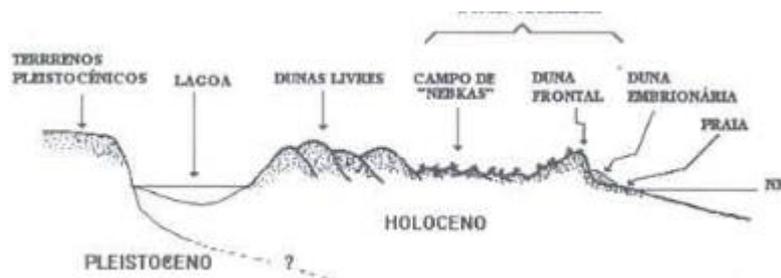
3.6 Relação entre dunas e sangradouros

As dunas presentes nas zonas costeiras desempenham um papel crucial na proteção costeira contra os riscos decorrentes das mudanças climáticas. No Rio Grande do Sul, encontra-se um dos maiores sistemas eólicos ativos no Brasil, abrangendo mais de 600 km de extensão, com uma largura média que varia entre 5 e 8 km, conforme destacado por Tomazelli (1994).

As dunas frontais Originam-se a partir das dunas embrionárias, estruturas que evoluem através do aumento em altura e do desenvolvimento lateral, culminando na formação dos cordões de dunas frontais, conforme destacado por Tomazelli (1994).

Na figura 14 é possível observar a localização das dunas frontais em um perfil transversal do campo eólico holocênico do Litoral Norte do Rio grande do Sul, desenvolvido por Tomazelli (1994).

Figura 14 - Perfil transversal de campo eólico



Fonte: Tomazelli (1994)

Na costa do Rio Grande do Sul, nota-se a presença de corpos d'água que interrompem os cordões de dunas frontais. Essas formações são conhecidas como sangradouros.

Os sangradouros presentes na Zona Costeira do Rio Grande do Sul atuam na descontinuidade de cordões de dunas, influenciando diretamente na redução das dunas frontais e no aumento da exposição da costa a eventos de inundação. Segundo Calliari & Figueiredo (2005), a presença de sangradouros são comuns no litoral sul do Brasil mas raramente são encontrados em outras zonas costeiras ao redor do mundo.

Os sangradouros são cursos d'água os quais fazem parte da drenagem da planície costeira, dando escoamento às águas pluviais coletadas nas depressões e banhados localizados entre cordões litorâneos, e em locais de relevo inexpressivo atrás das dunas frontais (PEREIRA DA SILVA & CALLIARI, 1997).

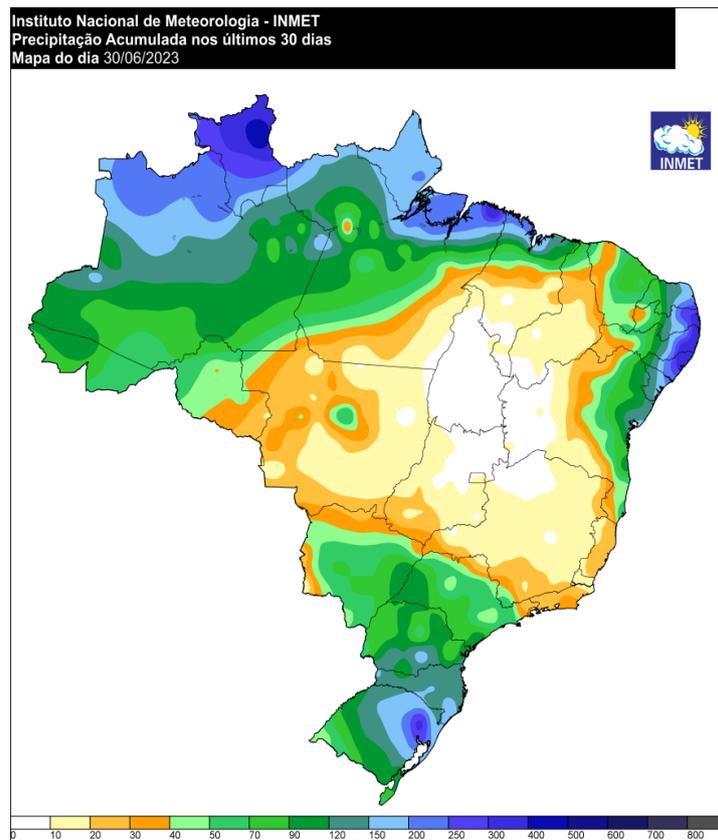
Segundo Pereira da Silva (1998), os processos relativos à erosão, transporte e deposição de sedimentos através destes cursos d'água afetam a região compreendida entre o campo de dunas mais interiorizado e a face da praia, contribuindo para a desestabilização do sistema de dunas frontais.

O aumento da urbanização e a falta de planejamento de infraestrutura urbana, bem como a consequente drenagem ineficiente, são fatores que contribuem para o surgimento de sangradouros na costa. Segundo Serpa (2008) a impermeabilização do solo associada a urbanização, contribue para o aumento de vazão nos sangradouros existentes, assim como o surgimento de novos sangradouros.

Segundo Calliari & Figueiredo (2005) “o aumento do número de sangradouros nas urbanas podem acarretar em déficit sedimentar praias e erosão costeira, levando em consideração o maior transporte de sedimentos para a zona de arrebatamento”.

O aumento de eventos extremos, como os ciclones, acarretam em uma maior intensidade de chuvas nas zonas costeiras, especialmente no inverno. Segundo um levantamento do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), que pode ser visto na Figura 12, um dos principais fenômenos meteorológicos que atuaram no Brasil em Junho de 2023 foram as chuvas intensas e consequentemente os alagamentos. Sendo registrado volumes de precipitação que ultrapassam a média histórica no Rio Grande do Sul (INMET, 2023). A Figura 15 mostra o mapa de acumulado de chuva em junho de 2023 para o Brasil. Em relação a Região Sul, um ciclone extratropical foi um dos principais responsáveis pela chuva, especialmente, no Rio Grande do Sul (INMET,2023). O aumento do volume de chuvas no inverno em decorrência de eventos como os ciclones aumentam a demanda por melhores sistemas de drenagem urbana.

Figura 15 - Mapa de acumulado de chuva, em milímetros (mm)/Junho 2023



Fonte: INMET, 2023.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 ARTIGO 1 - Integrating New Data for Coastal Vulnerability Assessment: Case Study in Quintão, RS, Brazil

Integrating New Data for Coastal Vulnerability Assessment: Case Study in Quintão, RS, Brazil

ABSTRACT

This study delves into the intricate dynamics of coastal zones, recognizing them as sensitive environments shaped by continuous erosive and sedimentary processes, alongside fragile ecosystems. The escalating population growth in coastal ecosystems exerts pressure on natural features like dunes, diminishing the ecosystem's capacity to shield residents from coastal hazards exacerbated by climate change. Recognizing a global need for comprehensive methodologies to assess coastal vulnerability, this study addresses this gap by developing an integrated approach, proposing a Coastal Vulnerability Index (CVI). This index incorporates biogeophysical data to identify areas most at risk from flooding and erosion, along with socio-economic variables detailing populations vulnerable to coastal hazards. This study's methodology, tested in the diverse Quintão district of the southern coast of Brazil, includes a multi-criteria analysis integrating biogeophysical and socio-economic factors. The results indicate that 54.4% of points exhibit low vulnerability, tied to factors like low population density, while 10.7% demonstrate high vulnerability, especially in urban areas. The urban areas presented elevated biogeophysical and socio-economic indices, highlighting overtopping density and increased population vulnerability.

Keywords: Climate changes, Erosion and flooding, Coastal hazards, Washouts, Coastal protection, Adaptation strategies.

1. Introduction

Coastal zones represent intricately sensitive environments, shaped both by constant physical dynamics arising from erosive and depositional sediment processes and by delicate ecosystems. The escalating anthropogenic pressures in these areas leads to the depletion of essential habitats, rendering them susceptible to extreme events, a condition termed coastal vulnerability. The concept of coastal vulnerability (CV) is fundamentally associated with the notion that the coastal environment is susceptible to adverse impacts from one or more factors, whether they are of environmental and/or anthropogenic origin. CV is the predisposition of the coast to respond adversely to hazards like erosion, sea-level rise, and storm surges [1]. Consequently, these hazards have the potential to disrupt or harm both the physical structures of communities and ecosystems and the services they provide within the area. Likewise, vulnerability is characterized by the environment's inclination to be adversely affected, encompassing elements such as sensitivity, susceptibility to harm, and a lack of capacity to confront and adapt to adverse changes [2]. The IPCC emphasizes that vulnerability varies within communities and societies and undergoes temporal changes.

In the coastal zone of the Rio Grande do Sul State, extensive dune fields are observable, providing fundamental ecosystem services for the protection of the resident population against the increasing incidence of extreme events. The height of the frontal dunes on the coast of Rio Grande do Sul increases from north to south, with the tallest dunes found in the Dunas Altas Balneary, in the Quintão district, ranging from 6 to 8 meters in height [3]. Due to population growth impacting the ecosystem, particularly in Rio Grande do Sul, interference with sand dunes leads to a reduction in the ecosystem and its capacity to protect the population. The washouts, natural watercourses facilitating the drainage of rainwater in depressions behind frontal dunes [4], play a pivotal role in connecting sandy beach environments to the sea. These features contribute significantly to material transfer between the sea and the coastal area, aiding in sediment management and flood control. Notably, during periods of relative sea level rise from meteorological tides, a noticeable reversal occurs in the flow of washouts [5-9]. This reversal not only dynamically influences the interaction between the coast and the ocean but also triggers sudden floods in urbanized lower regions [10].

Recognizing the significance of washouts in the coastal context of Rio Grande do Sul and the imperative to enhance local and regional coastal vulnerability assessments, we propose the integration of new data into the conventional model, such as the Coastal vulnerability Model (INVEST,2024). Given the prevalent use of Geographic Information Systems (GIS) methodologies in spatial modeling for coastal vulnerability analysis, this study aims to strengthen the existing GIS-operationalized model [11]. Our objective is to include the variable “washout density” in regions with substantial occurrences, alongside the socioeconomic variables applied in prior studies [12,13].

This study aims to evaluate coastal vulnerability, focusing on the District of Quintão, Palmares do Sul municipality, Rio Grande do Sul State. We consider that Quintão characteristics reflect the general situation of washouts on the Rio Grande do Sul coast. We have proposed the development of a Coastal Vulnerability Index, involving the integration of biogeophysical and socioeconomic data. This methodology is distinguished by the inclusion of variables such as habitats, topography, exposure to wind and waves, and the innovative variable 'washouts.' The socioeconomic analysis incorporates data pertaining to individuals with low income, as well as the elderly and children. This methodology enables replication on various segments in the State of Rio Grande do Sul, as it relies on indirectly obtained data and employs a multi-criteria analysis to calculate the index. To ensure proximity to reality, both qualitative and quantitative descriptors influencing the shoreline and long-term erosion patterns were taken into account. Furthermore, the integration of washouts density was suggested to enhance and complement the CVI index.

2. Methodology

2.1. Study area

The study area comprises the district of Quintão, located in the coastal sector of the municipality of Palmares do Sul, on the middle coast of the State of Rio Grande do Sul (Fig 1). The district of Quintão totalize an area of 141.17 km², with an estimated population of 3,069 inhabitants according to the latest census made available by the *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (Brazilian Institute of Geography and Statistics) [14]. It is located in the hydrographic basin of Tramandaí River. Regarding geology, almost completely, the district has the geological unit “Holocene wind covers”, characterized by the presence of

dunes (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1995). In relation to the climate, according to the Köppen-Geiger classification it is humid subtropical (Cfa), predominant on the coast of Rio Grande do Sul. Summers are hot, with temperatures above 22°C [15].

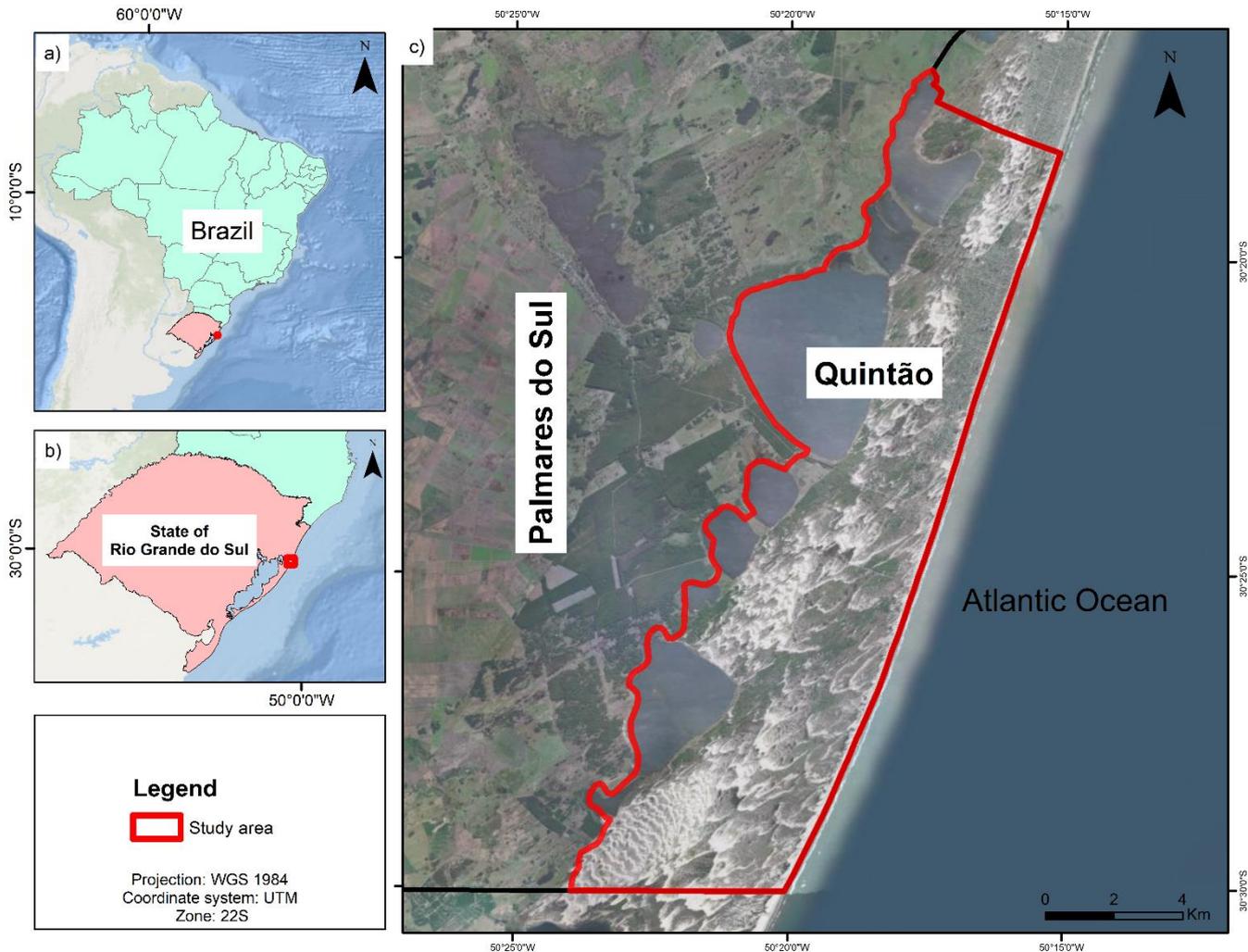


Fig 1 - Location of study area in municipality of Palmares do Sul (c), state of Rio Grande do Sul (b), Southern Brazil (a).

The district of Quintão totalize an area of 141.17 km², with an estimated population of 3,069 inhabitants according to the latest census made available by the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brazilian Institute of Geography and Statistics) [14]. It is located in the hydrographic basin of Tramandaí. Regarding geology, almost completely, the district has the geological unit “Holocene wind covers”, characterized by the presence of dunes.

In relation to the climate, according to the Köppen-Geiger classification it is humid subtropical (Cfa), predominant on the coast of Rio Grande do Sul. Summers are hot, with temperatures above 22°C [15].

2.2. Biogeophysical Index of Coastal Exposure

In order to develop a biogeophysical coastal exposure index applicable to local and regional application, the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) software was applied through its package of Coastal Vulnerability (CV). The CV model assessed the predisposition of the shoreline to coastal hazards. The biogeophysical variables incorporated by the package are: topobathymetric model, natural habitats, wave, wind, surge and geomorphology. In addition to these, we used a map of the density of washouts. These descriptors were independently categorized on a vulnerability scale ranging from (1) very low to (5) very high, and subsequently incorporated into an attribute table within the Geographic Information System (GIS).

2.2.1. Data structure and information sources

Topobathymetric model: The topographic data utilized corresponds to altimetric information derived from the digital elevation model of STRM (Shuttle Radar Topography Mission), obtained through the Earth Explorer website of the USGS (United States Geological Survey) with spatial resolution of 30 m, published on 09/23/2014 [16]. These data were merged with bathymetric information acquired from the GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) [17].

Wave, Wind, and Surge: wave, wind, and storm surge event potential were calculated using a global dataset developed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and the National Centers for Environmental Predictions (NCEP). These datasets were collected worldwide over an eight-year period, as documented by [18].

Geomorphology: geomorphology data was manually vectorized based on the geomorphological map provided by IBGE at a 1:250,000 scale [19]. While the utilization of geomorphology data is not mandatory for the CV model, it is recommended in this study, given that the predominant portion of the study area encompasses dune systems and related environments.

Natural habitats: geoprocessing techniques and digital image classification were employed to map natural habitats in the study area by using ArcMap 10.8 software. The satellite image used for the dune mapping was obtained from Landsat-9 with a spatial resolution of 30 meters, dated 1/12/2022, acquired through the Earth Explorer website (USGS). The mapping process consisted of three main stages: initially, various spectral band compositions were generated to achieve better target differentiation, along with the development of image indices such as Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Subsequently, through visual image interpretation techniques, the delimitation was performed at a scale of 1:80,000. Finally, a reclassification of the Dune class was executed, distinguishing between "Low Dune" and "High Dune." For high dunes, an exposure value of "2" was assigned, indicating the degree of less exposition, and the distance that this habitat protects the surrounding environments was set at 500 meters. While, for low dunes, an exposure value of "3.5" was assigned, with a protection distance of 100 meters.

Washouts: The washouts map was generated in two main stages: initially, images were obtained from the CBERS-4A satellite with a spatial resolution of 8 meters dated 06/08/2023, And then, different spectral band compositions were created, including the composition formed by the near-infrared band ranging from 0.77 to 0.89 μm (Band 4), the red band ranging from 0.63 to 0.69 μm (Band 3), and the green band ranging from 0.52 to 0.59 μm (Band 2), resulting in the RGB432 composition. In order to improve the spatial resolution of washouts analysis, digital image processing techniques were applied in Arcgis

software by using the Pan Sharpening tool, obtaining a sharpened image with a spatial resolution of 2m. A total of 26 washouts points were identified along the coast and mapped by generating points along the coast by using ArcMap 10.8 software. Subsequently, with the points collected, the kernel density was performed in the ArcMap software with a search radius of 200m. The result was used to differentiate between each of the density classes, ranging from 1 to 5, where 1 is very low density of washouts and 5 is very high density of washouts (Fig 2).

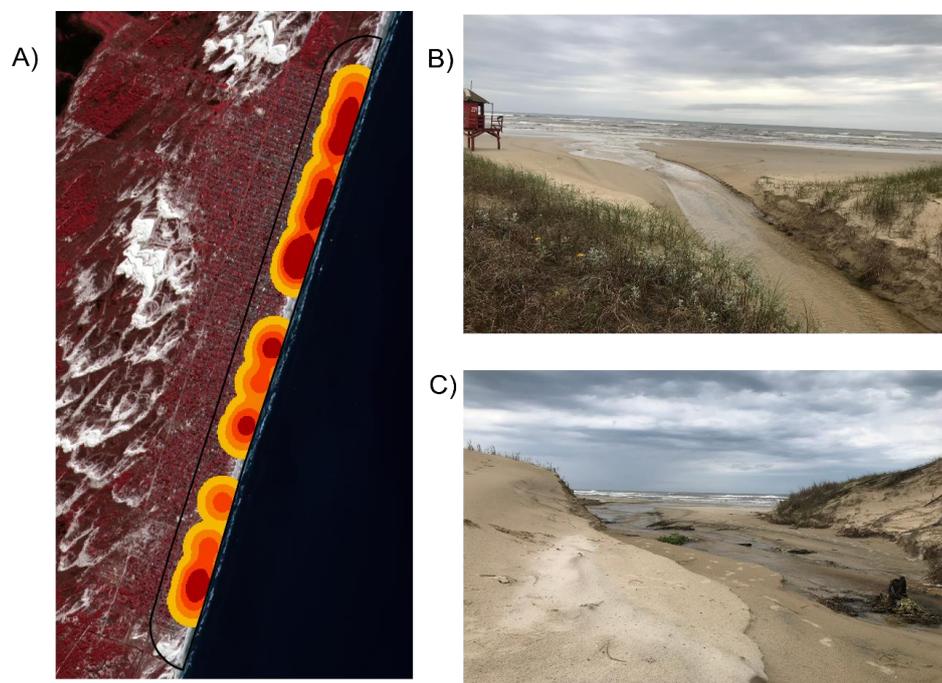


Fig 2 - Washouts density in the urban area of Quintão District (A), urban washout example (b), natural washout example (a).

The model computed the exposure index for each coastal point as the geometric mean of all variable classifications, expressed by Eq. (1), where BE represents the Index of Biogeophysical Exposure, n is the number of variables, and R_i denotes the biogeophysical variable.

$$BE = \left(\prod_{i=1}^n R_i \right)^{1/n} \quad (1)$$

Following this computation, the model generated output files in vector format that overlaid with the studied coastline at 30 m intervals. These output files include numerical indices and classifications of the input variables, forming the basis for the resulting maps.

2.3. Socioeconomic Index of Coastal Exposure

In order to calculate coastal exposure with socio-economic data, we used data from the latest IBGE census [14]. The data corresponds to the census tract, the smallest area available for obtaining socio-economic data from the study area.

The socio-economic exposure index includes data on the resident population. The selected variables include population age and population income obtained through the percentage of the total population of the census tract and population density obtained through the calculation of the number of inhabitants per the area of the census tract.

Each of these descriptors, associated with the adaptive capacity of the population to hazards, was individually classified using Natural Breaks classification on a vulnerability scale ranging from (1) very low to (5) very high and subsequently incorporated into an attribute table within the GIS.

2.3.1. Data structure and information sources

Population age: The population's age data was selected according to the age group: children, up to 12 years old, used as a reference the statute of the child and adolescent of Brazil [20] and the elderly, over 60 years old, according to the Institute of the Elderly of Brazil (Brasil, 2003) [21]. The data was selected individually and grouped according to age group. They were then inserted into the attribute table in the GIS environment.

Population income: Census data was used to select the population with a per capita income of up to 1 minimum wage. Since this is Brazilian census data, the minimum wage corresponds to the Brazilian minimum wage. The data was grouped by census tract and salary bracket and entered into the attribute table.

Population density: The population density data was obtained by taking the number of inhabitants in each census tract and dividing it by the area in square kilometers. The data was then scaled between 1 and 5, where the locations with the highest population density received a value of 5 and the locations with the lowest population density received a value of 1.

The socio-economic exposure index was calculated using the arithmetic average of the values of the selected variables according to the Eq. (2):

$$SE = \frac{Pa+Pi+Pd}{3} \quad (2)$$

Where SE is the socioeconomic exposure, Pa is population age, Pi is population income and Pd is population density. The data obtained was integrated into the attribute table for each census tract.

After calculating the Socioeconomic Exposure, the Biogeophysical and Socioeconomic Exposure data had to be made compatible. In ArcMap software, the points generated in the biogeophysical exposure were grouped in relation to the census sectors using the Intersect tool. The data was organized in a spreadsheet where all the points generated over the coastline for each census tract were selected and assigned values related to socioeconomic exposure were obtained through the average of points for each of the census tracts. Then, using the Spatial Join tool in the GIS software, the final table was linked with the generated points. Each point distributed along the coastline, every 30 meters, contains biogeophysical and socioeconomic exposure data.

2.4. Coastal Vulnerability Index

The proposed Coastal Vulnerability Index (CVI) was calculated by aggregating the variables utilized in the biogeophysical exposure index and the socio-economic exposure

index, as per Eq (3), where CVI represents the Coastal Vulnerability Index, BE is the Biogeophysical Exposure Index and SE is the Socio-economic Exposure Index.

$$CVI = \left(\frac{BE+SE}{2} \right) \quad (3)$$

From the results of this analysis, the proposed CVI is estimated , ranging from 1 to 5, where 5 indicates very high vulnerability and 1 indicates very low vulnerability, as per the Table (1).

Table 1 - Coastal Vulnerability Index (CVI)

0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
Very Low	Low	Moderate	High	Very High

The Coastal Vulnerability Index values were assigned to each point along the coastline, and the final data were subsequently classified based on the degree of vulnerability. Additionally, using RStudio software, correlation analysis was conducted to identify the correlation between biogeophysical and socioeconomic exposure indices with the coastal vulnerability index.

3. Results and Discussion

3.1. Biogeophysical Index of Coastal Exposure

The data obtained by running the Biogeophysical Index of Coastal Exposure indicates which areas are most exposed to extreme events and coastal risks in relation to biogeophysical variables. The results for each of these variables are shown in Fig. 3.

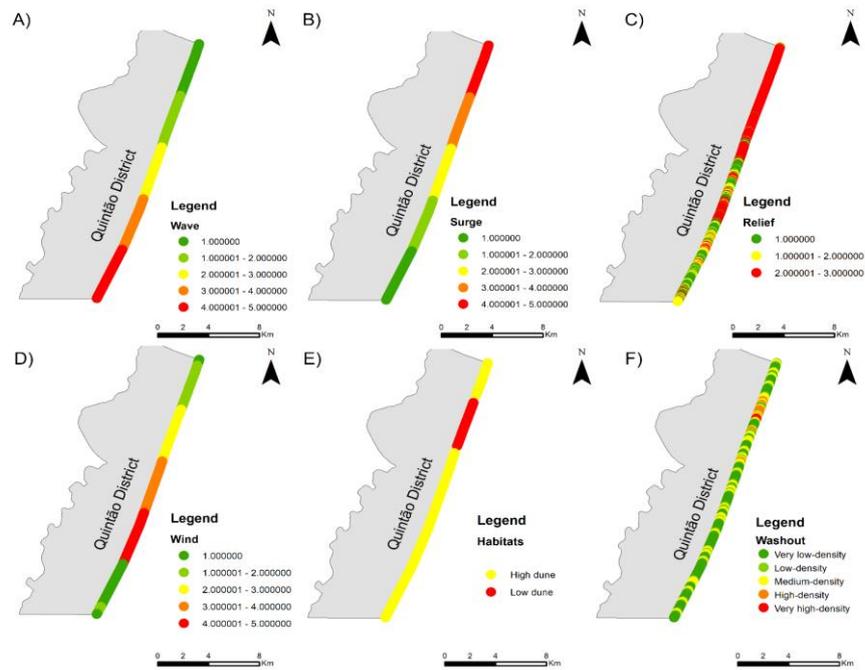


Fig 3 - Variables used in the biogeophysical exposure index. Wave (A), Surge (B), Relief (C), Wind (D), Habitats (E) and Washouts (F).

Analyzing the results of the variables independently, we can notice that in the northern part of the study area, there is a greater exposure due to the surge, relief and habitat variables. This area is close to the urban area of the Quintão district. The relief is characterized by low narrow dunes and the occurrence of a higher density of washouts, which are also wider and more flowing than the rest of the coastline. In the southern part of the district, there are the lowest exposure values related to potential surge and wind. There is no urban area in this location, and the washouts are less dense. This is an area with less anthropogenic interference and well-developed dunes, which help to protect the coast.

The combination of these variables generates the biogeophysical exposure index, which assesses the biogeophysical exposure of the environment to the influence of critical phenomena resulting from natural conditions. The results of the biogeophysical exposure index indicates the most exposed areas along the coastline and are shown in Fig 4.

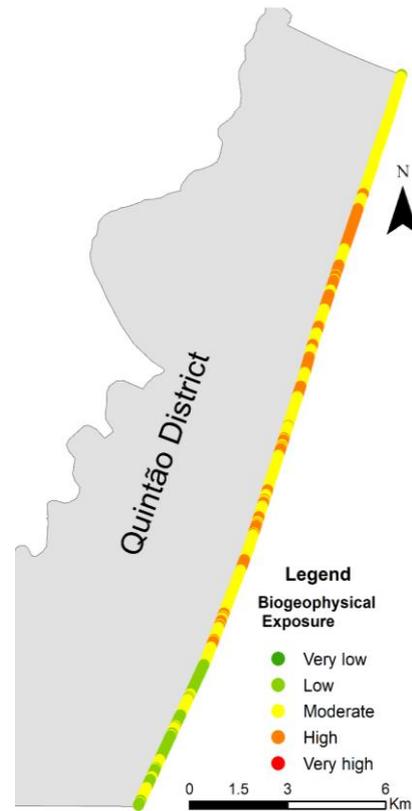


Fig 4 - Biogeophysical exposure index.

Based on the Biogeophysical Exposure Map, it was possible to observe that several areas were classified as having medium or high exposure along the coast. In the vicinity of the urban area, the high and medium vulnerability values are directly related to the habitat, especially the dunes, which in this region are predominantly low due to the greater anthropogenic pressures on the natural environment. The same was described by [13], who observed that in areas with lower elevation or less developed dune fields, there was a correspondence with regions more exposed to biogeophysical variables.

In addition, there has been an increase in the density of washouts in the urban area. [22] had previously delineated that in urbanized areas, street pavement induces soil impermeabilization, leading to an augmented concentration of these water bodies. According to [23], when washouts cause intense erosion of the dunes, the dune ridge does not regenerate over the drier months, rendering these areas permanently susceptible to

flooding. Thus, the highest density of washouts combined with low and narrow dunes, corroborates greater biogeophysical exposure in this region.

In the southern portion, there are areas with lower exposure, notably associated with less human interference and the presence of well-developed dunes, which contribute to reducing exposure. Washouts have been identified along the entire coastline, there are isolated and natural, responsible for rainwater runoff, but far from the urban area.

3.2. Socioeconomic Index of Coastal Exposure

The individual results of each socioeconomic variable (Fig 5) indicate the most exposed areas and their influence on the socioeconomic exposure index.

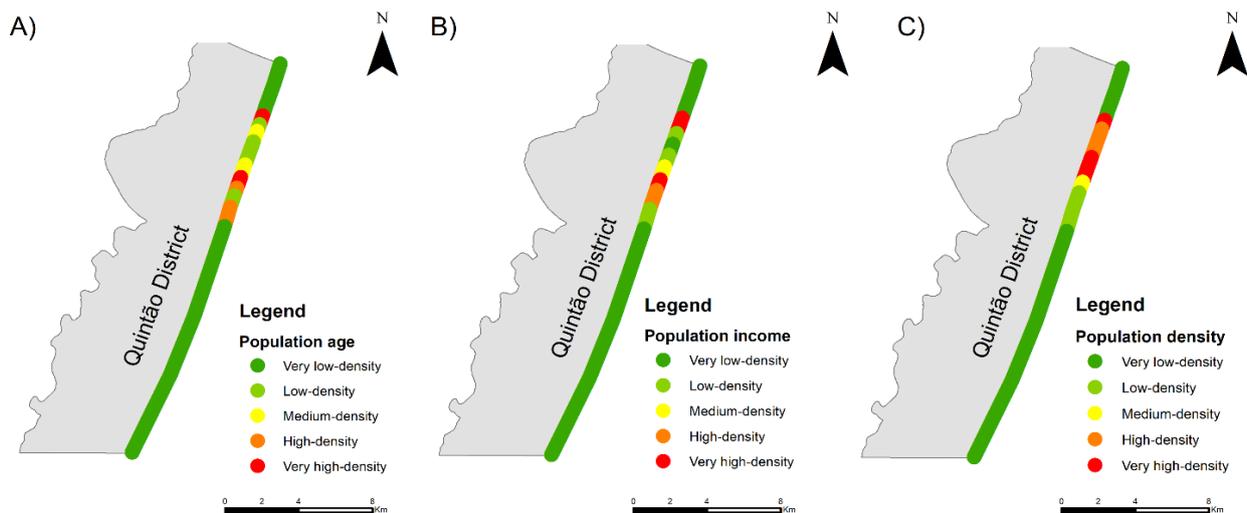


Fig 5 - Variables used in the socioeconomic exposure index. Population age (A), Population income (B) and Population density (C).

The socioeconomic exposure index (Fig 6) indicates the most exposed areas. The Socioeconomic Exposure Index (SEI) mirrors the adaptive capacity of a region. Adaptive capacity is indicative of the social and economic conditions enabling a population to adapt and thrive in overcoming impacts resulting from a hazard [24].

Due to the concentration of the urban area in the northern part of the district, the highest exposure values are in this region. In general, the increase of population in this area, the greater concentration of low-income people, the elderly and children indicate that the northern part of the district has the greatest exposure and vulnerability of the resident population. In the south and far north of the district, the lowest exposure values are observed, especially associated with lower population density and the absence of a vulnerable population.

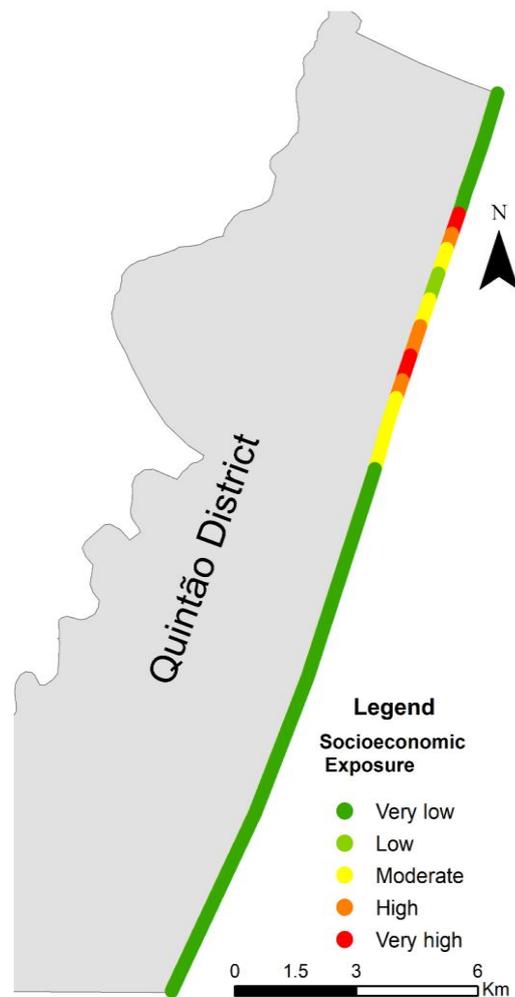


Fig 6 - Socioeconomic exposure index.

3.3. Coastal Vulnerability Index

The combined analysis of the Biogeophysical Index of Coastal Exposure and Socioeconomic Index of Coastal Exposure (Fig 7) allowed the analysis of areas most vulnerable to the occurrence of coastal hazards.

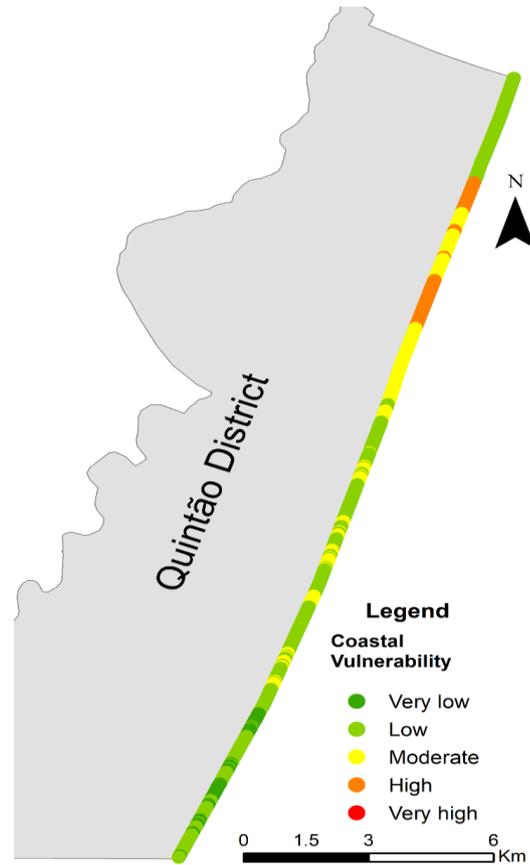


Fig 7 - Coastal Vulnerability Index

The results obtained from the Coastal Vulnerability Index (CVI) indicate an average of 2.119, and the median value was 1.904. The minimum values identified correspond to 1.405 and the maximum is 3.915 (Fig 8)

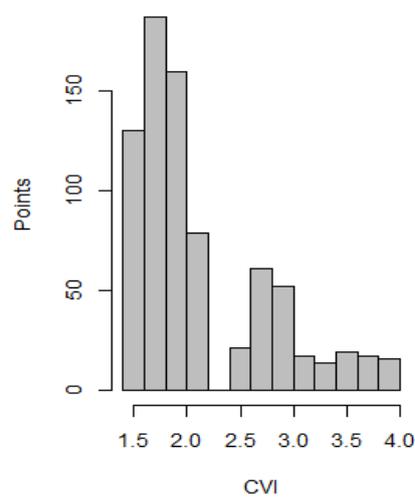


Fig 8 - CVI median of points

The data indicates that high coastal vulnerability predominates in the northern part of the district, near the urban area. Among the 772 points distributed throughout the analyzed area, 83 points (10.75%) exhibited high vulnerability and were located in the proximity to urban areas, where the highest values of biogeophysical and socioeconomic exposure converge. These variables were particularly associated with the increased presence of vulnerable populations and the concentration of higher socioeconomic exposure values. Furthermore, there is a prevalence of exposure in this area for three individual variables of the biogeophysical exposure index: surge, relief, and habitats.

The variable washout density proved to be influential in the coastal vulnerability index, leading to higher values, especially in the vicinity of the urban area, where a greater density of these features was observed.

Regarding the moderate vulnerability, 213 points (27.59%) were classified in this category. The occurrence of average CVI encompasses both urban areas with lower population density and a higher number of washouts, as well as locations further south in the district with low human occupation, but still exhibiting the natural presence of washouts. Even in these areas with low urbanization and limited anthropogenic activities, the washouts interrupt the dunes, being responsible for draining rainwater. Thus, these areas also demonstrate a moderate exposure to coastal risks.

Regarding low coastal vulnerability, out of the total points along the coastline, 420 (54.40%) fell into this category. These values are predominantly located in the extreme northern and southern portions of the district. Upon examining individual variables, it is evident that the absence of a vulnerable population, well-developed dune fields, and lower washout density contributed to lower coastal vulnerability values.

Concerning very low coastal vulnerability, 57 points (7.38%) were into this category, located exclusively in the southernmost part of the district. In this region, the lowest biogeophysical exposure indices were observed, along with the presence of well-developed dune fields, lower washout density, low population density, and the absence of vulnerable populations.

It is noteworthy that no points with very high coastal vulnerability values were identified.

One of the reasons for this observation is that, despite the presence of low and narrow dunes and a high density of washouts in the study area, the existing dunes prove effective in protecting the resident population. Therefore, it is crucial to implement measures for the preservation of these ecosystems to prevent areas subject to high vulnerabilities from evolving into conditions of very high vulnerability.

The correlation analysis (Table 2), conducted using the Pearson correlation coefficient (r), enabled the identification of the correlation between socioeconomic and biogeophysical exposure concerning the coastal vulnerability index.

Table 2 - Correlation between the BEI, SEI and VCI indices.

	BEI	SEI
VCI	0.675***	0.950***

Significance Level = $p < 0,001$ (***)

Values closer to 1 have a higher correlation between the data. This correlation can be better seen in Fig 9, where we can see a correlation between the EIB and the SEI in relation to the CVI and also analyze the individual distribution of the indices.

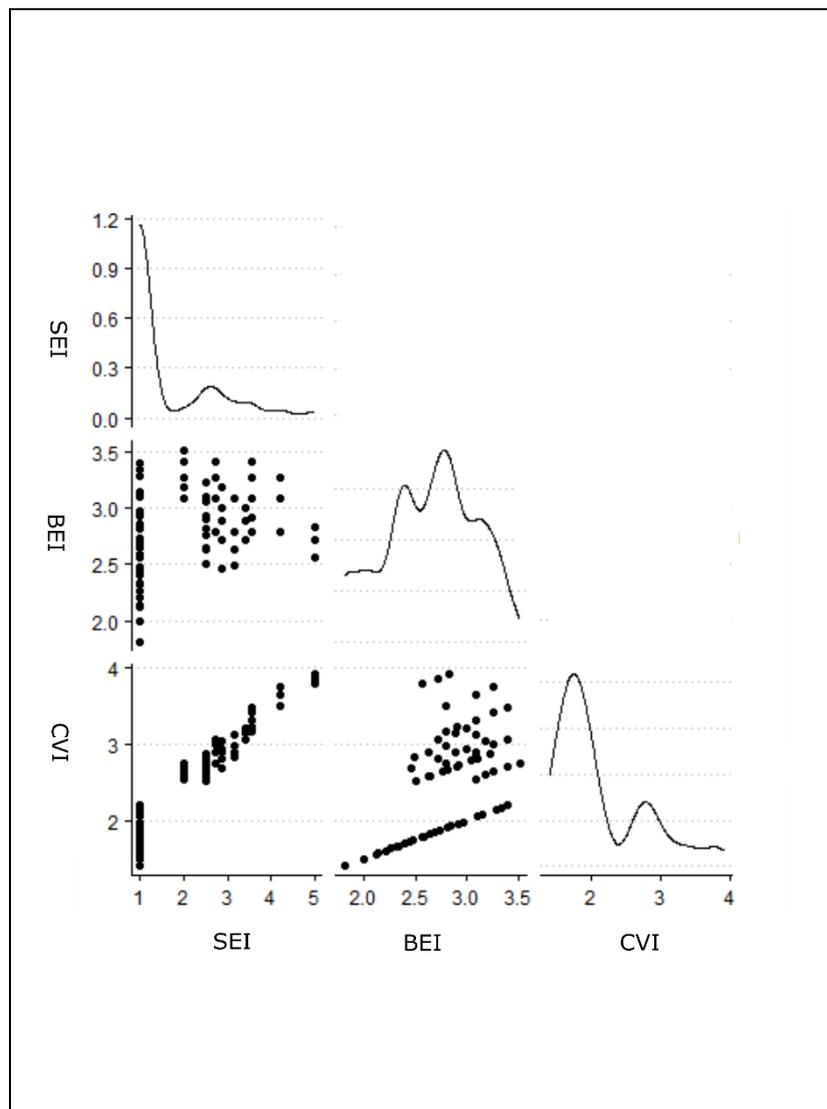


Fig 9 - Correlation and concentration of indices: BEI, SEI, CVI.

Initially, it can be seen that the socio-economic exposure index has the highest correlation with the coastal vulnerability index. This is mainly due to the concentration of vulnerable populations, especially in the northern part of the district, where the highest coastal vulnerability values were also identified. In relation to the biogeophysical index, the correlation

with the coastal vulnerability index has a lower value, especially due to the greater distribution of variables along the coastline, but it was observed that one variable complemented the other, since due to the increase in population in the urban area linked to inefficient drainage, this led both to a decrease in the height and width of the dunes, as well as a higher density of washouts, leaving the coastal vulnerability index higher in the vicinity of the urban area.

The inclusion of bleeders in the coastal vulnerability index was crucial for measuring local coastal vulnerability. The inclusion of this variable allowed for a more comprehensive and refined index, along with other biogeophysical and socioeconomic variables, enabling an analysis of the most vulnerable locations exposed to heightened coastal hazards due to climate change.

4. Final considerations

The analysis conducted in this study, through the use of biogeophysical and socioeconomic variables for the development of a coastal vulnerability index, demonstrated the importance of an integrated approach in identifying the most vulnerable areas exposed to coastal risks. Adapting the method to incorporate fundamental variables specific to each region enables a more comprehensive and accurate analysis. The new methodology proposed in this work, with the inclusion of washout data, allows for the replication of the method for analysis in other areas and regions, especially those with the presence of washouts in their surroundings.

The results of this study can support the development of public policies of coastal protection and management, especially in areas with the presence of washouts along the coast. The integration of the Biogeophysical Exposure Index (BEI) with the inclusion of washouts in its composition, and the Socioeconomic Exposure Index (SEI) with variables related to the vulnerability and exposure of the population to coastal risks, constitutes the proposed Coastal Vulnerability Index in this work. It is hoped that this study can contribute to

new research on coastal vulnerability and support public policies and strategies aimed at mitigating coastal risks and promoting resilience in affected communities.

References

- [01] V. Gornitz. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology*. (1991) 89 (4), 379–398. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90173-O](http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O).
- [02] H.O. Pörtner et al. IPCC, 2022: Summary for policymakers. (2022). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/summary-for-policymakers/>
- [03] H.D. Vianna.; L.J. Variabilidade do sistema praia-dunas frontais para o litoral norte do Rio Grande do Sul (Palmares do Sul a Torres, Brasil) com o auxílio do *Light Detection and Ranging–Lidar*. *Pesquisas em Geociências*, (2015), v. 42, n. 2, p. 141-158. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78116>.
- [04] R. PEREIRA DA SILVA. Ocorrência, distribuição e características morfodinâmicas dos sangradouros na zona costeira do Rio Grande do Sul: trecho Rio Grande-Chuí, RS. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (1998).
- [05] I.L. Turner; B.P. Coates; R.I. Acworth. Tides, waves and the super-elevation of groundwater at the coast. *Journal of Coastal Research*, p. 46-60, (1997).
- [06] S.A. Figueiredo; P. Cowell; A. Short. Intermittent backbeach discharge to the surfzone: modes and geomorphologic implications. *Journal of Coastal Research*, p. 610-614, (2007).
- [07] C.G. Serpa. Estudo da influência dos fatores climáticos, hidrológicos e morfológicos no ciclo de vida de um sangradouro intermitente, Praia do Cassino, Brasil. (2008). Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande, Engenharia Oceânica.

- [08] A.L.R. Goulart; R.J. Cozza. Geotecnologias aplicadas ao estudo e manejo de sangradouros, estudo de caso do Arroio Querência, praia do Cassino, RS. Monografia (Técnico em Geomática). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul–Rio Grande/RS, (2010).
- [09] N.Z. Maia. Avaliação da elevação do nível do mar e riscos de inundação costeira associados à passagem de ciclones no Balneário Hermenegildo, RS. Universidade do Rio Grande, (2011).
- [10] L.J. Calliari *et al.* Perigos e riscos associados a processos costeiros no litoral sul do Brasil (RS): uma síntese. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, (2010) v. 14, n. 1, p. 51-63. [10.14210/bjast.v14n1.p51-63](https://doi.org/10.14210/bjast.v14n1.p51-63).
- [11] R. Sharp *et al.* InVEST 3.8.7. User's Guide. The Natural Capital Project, Standford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund: Standford, CA, USA, (2020).
- [12] J.L. Nicolodi; R.M. Petermann. Potential vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social, and technological aspects. (2010).
- [13] G.A. Sfredo, T.S. da Silva, & E.G. Barboza. Assessment of local coastal vulnerability based on a global model: A case study in Jaguaruna, southern Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 61, 102824.(2023).
- [14] IBGE. Base de Informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por Setor Censitário. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Centro de Documentação e Disseminação de Informações, Rio de Janeiro, <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>.(2011).
- [15] A.N. Strahler. *Physical Geography*. The Köppen climate classification system. Pag. 185-188. Ed. J. Wiley, (1963) (2ª edição).

[16] T.G. Farr, M. Kobrick . Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. EOS Trans. Am. Geophys. Union 81 (48), 583–585.

<http://dx.doi.org/10.1029/EO081i048p00583>.(2000).

[17] GEBCO Bathymetric Compilation Group. The GEBCO_2020 Grid - a continuous terrain model of the global oceans and land. British Oceanographic Data Centre, National Oceanography, Centre, NERC, UK, <http://dx.doi.org/10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9>.(2020).

[18] H.L. Tolman. User Manual and System Documentation of WavewatchIII Version 3.14. U. S. Department of Commerce/ National Oceanic and Atmospheric Administration/ National Weather Service, Camp Springs,(2009).

https://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn276/MMAB_276.pdf.

[19] IBGE, Geomorfologia . Folha Palmares do Sul, SH.22-Z-A.(2003).

[20] BRASIL, Lei n.º 8.069, de 13 de julho de 1990. Dispõe sobre o Estatuto da Criança e do Adolescente e dá outras providências. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8069.htm

[21] BRASIL, Lei n.º 10.741, de 1º de outubro de 2003. Dispõe sobre o Estatuto da Pessoa Idosa e dá outras providências. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/l10.741.htm

[22] S.A. Figueiredo; L.J. Calliari. Washouts in the central and northern littoral of Rio Grande do Sul state, Brazil: distribution and implications. Journal of Coastal Research, SI, v. 39, p. 366-370, (2006).

[23] C.G. Serpa. Morfodinâmica praial relacionada à presença de corpos de água intermitentes em duas praias da costa do Rio Grande do Sul, Brasil. (2013).

[24] UNISDR. Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, (2009).

4.2 ARTIGO 2 - Análise temporal de mudanças no ecossistema de dunas do distrito de Quintão, Palmares do Sul /RS

ANÁLISE TEMPORAL DE MUDANÇAS NO ECOSSISTEMA DE DUNAS DO DISTRITO DE QUINTÃO, PALMARES DO SUL/RS

A TEMPORAL ANALYSIS OF CHANGES IN THE DUNE ECOSYSTEM OF QUINTÃO DISTRICT, PALMARES DO SUL/RS

RESUMO

As áreas costeiras, sujeitas a mudanças constantes devido a ações erosivas, deposicionais e antrópicas, enfrentam desafios físicos e ecossistêmicos significativos. As mudanças de uso e cobertura da terra ampliam a perda de habitats cruciais, como dunas, essenciais para serviços ecossistêmicos de proteção costeira. O presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise temporal de mudanças no ecossistema de dunas do distrito de Quintão. Para isso, foram selecionadas imagens Landsat de diferentes períodos e analisadas as mudanças obtidas através da classificação semiautomática das imagens. A partir da classificação, os dados foram inseridos no modelo Land Change Modeler no software TerrSet 2020 onde foram elaborados os mapas de transição, de mudança e de persistência das classes ao longo do período de análise. Os resultados obtidos indicam um aumento de 993% na área urbana no distrito entre 1985 e 2022. Já as áreas de dunas apresentaram uma diminuição em sua área de 34,45%. Diante das alterações ambientais identificadas decorrentes do crescimento urbano, propõe-se a implementação de um monitoramento contínuo da supressão de ambientes naturais em Quintão. Essa medida visa não apenas à preservação das dunas como parte fundamental do ecossistema costeiro, mas também a mitigação dos impactos negativos associados ao avanço urbano desordenado.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, Impactos da urbanização, Proteção costeira

ABSTRACT

Coastal areas, subject to constant changes due to erosive, depositional, and anthropic actions, face significant physical and ecosystem challenges. The land use and cover changes (LUCC) exacerbates the loss of crucial habitats, such as dunes, essential for coastal protection ecosystem services. The aim of this study is to conduct a temporal analysis of changes in the dune ecosystem in the Quintão district. To achieve this, Landsat images from different periods were selected, and changes were analyzed through the semi-automatic classification of the images. Following the classification, the data were input into the Land Change Modeler in the TerrSet 2020 software, where transition, change, and persistence maps of the classes were developed over the analysis period. The results indicate a 993% increase in urban area in the district, between 1985 and 2022. Conversely, dune areas experienced a decrease in their extent by 34.45%. Given the identified environmental changes resulting from urban growth, the continuous monitoring of the suppression of natural environments in Quintão is proposed. This measure aims not only at preserving dunes as a fundamental part of the coastal ecosystem but also at mitigating the negative impacts associated with disordered urban advancement.

Keywords: Climate change, Urbanization impacts, Coastal protection

INTRODUÇÃO

As áreas costeiras são ambientes extremamente sensíveis, sujeitas a mudanças constantes devido às ações erosivas e deposicionais de sedimentos, representando desafios tanto do ponto de vista físico quanto ecossistêmico. A pressão antrópica sobre esses ambientes amplifica a perda de habitats cruciais, como as dunas, desempenhando um papel fundamental na oferta de serviços ecossistêmicos essenciais para a proteção das zonas costeiras (Alexandrakis et al., 2015; Landrya et al., 2020).

Simultaneamente, a modificação global na ocupação e cobertura do solo ao longo das últimas décadas tem gerado impactos diretos na disponibilidade desses serviços ecossistêmicos. Compreender a dinâmica dessas transformações ao longo de períodos extensos, torna-se crucial para promover a gestão sustentável dos recursos naturais. No contexto específico da zona costeira do Rio Grande do Sul, estudos como os de Silva & Tagliani (2010), Grabski et al. (2015), Sfredo & Tagliani (2016) e Lipp-Nissinen et al. (2018) têm detalhado os ciclos de uso do espaço em diferentes regiões, correlacionando esses ciclos ao crescimento populacional com as modificações no uso e cobertura da terra, destacando mudanças significativas em todas as áreas investigadas.

Em 2010, o Censo Demográfico registrou que mais de 50 milhões de habitantes vivem nos municípios da zona costeira, representando 26,58% da população brasileira (IBGE, 2011). O aumento histórico da população nessas áreas gera crescente pressão sobre os ambientes naturais (Moraes, 1999; Reis et al., 2002; Barragán & Andrés, 2015).

Nesse sentido, Scherer et al. (2010) identificaram problemas que ocorrem na costa brasileira, relacionados à problemática investigada, como ocupação desordenada do solo e exploração de recursos naturais, resultando em impactos como a diminuição da biodiversidade, contaminação hídrica e erosão costeira. No âmbito socioeconômico, esses impactos envolvem perdas humanas e materiais, ligadas a desastres causados por ocupações em áreas de risco e falta de saneamento adequado. Em meio a essas questões, os ecossistemas costeiros oferecem serviços ecossistêmicos essenciais, como as dunas, que atuam como barreiras naturais de proteção contra a erosão costeira.

Inseridos nessa conjuntura, os ecossistemas costeiros proporcionam benefícios para o meio ambiente e a população, denominados serviços ecossistêmicos. Segundo Daily (1997), esses serviços referem-se às condições e aos processos pelos quais os ecossistemas naturais, juntamente com as espécies que os compõem, sustentam e satisfazem a vida humana. Um exemplo claro desses serviços é o papel desempenhado pelas dunas, que constituem barreiras naturais de proteção contra o avanço do mar e processos de erosão costeira, além de reduzirem a exposição a eventos de inundação da população residente próxima à costa.

No entanto, esses ecossistemas costeiros estão enfrentando ameaças significativas, incluindo a ocupação urbana desordenada que muitas vezes ocorre sobre as dunas. A falta de planejamento de infraestrutura urbana e a consequente drenagem ineficiente são fatores que contribuem para o surgimento de sangradouros na costa. Os sangradouros presentes na Zona Costeira do Rio Grande do Sul interrompem a continuidade dos cordões de dunas, influenciando diretamente na redução das dunas frontais e auxiliando no aumento da exposição da costa a eventos de inundação.

É importante observar que a presença de sangradouros é mais comum no litoral sul do Brasil do que em outras regiões costeiras ao redor do mundo, conforme destacado por Calliari & Figueiredo (2005). Além disso, segundo Calliari & Figueiredo (2005), "o aumento do número de sangradouros nas áreas urbanas pode acarretar déficit sedimentar praias e erosão costeira, considerando o maior transporte de sedimentos para a zona de arrebatamento". Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise temporal de mudanças no

ecossistema de dunas do Distrito de Quintão-RS, buscando compreender a dinâmica de alteração e os processos que contribuem para a redução dos ecossistemas de dunas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreende o distrito costeiro de Quintão, município de Palmares do Sul, situado no litoral médio do Rio Grande do Sul (Figura 1).

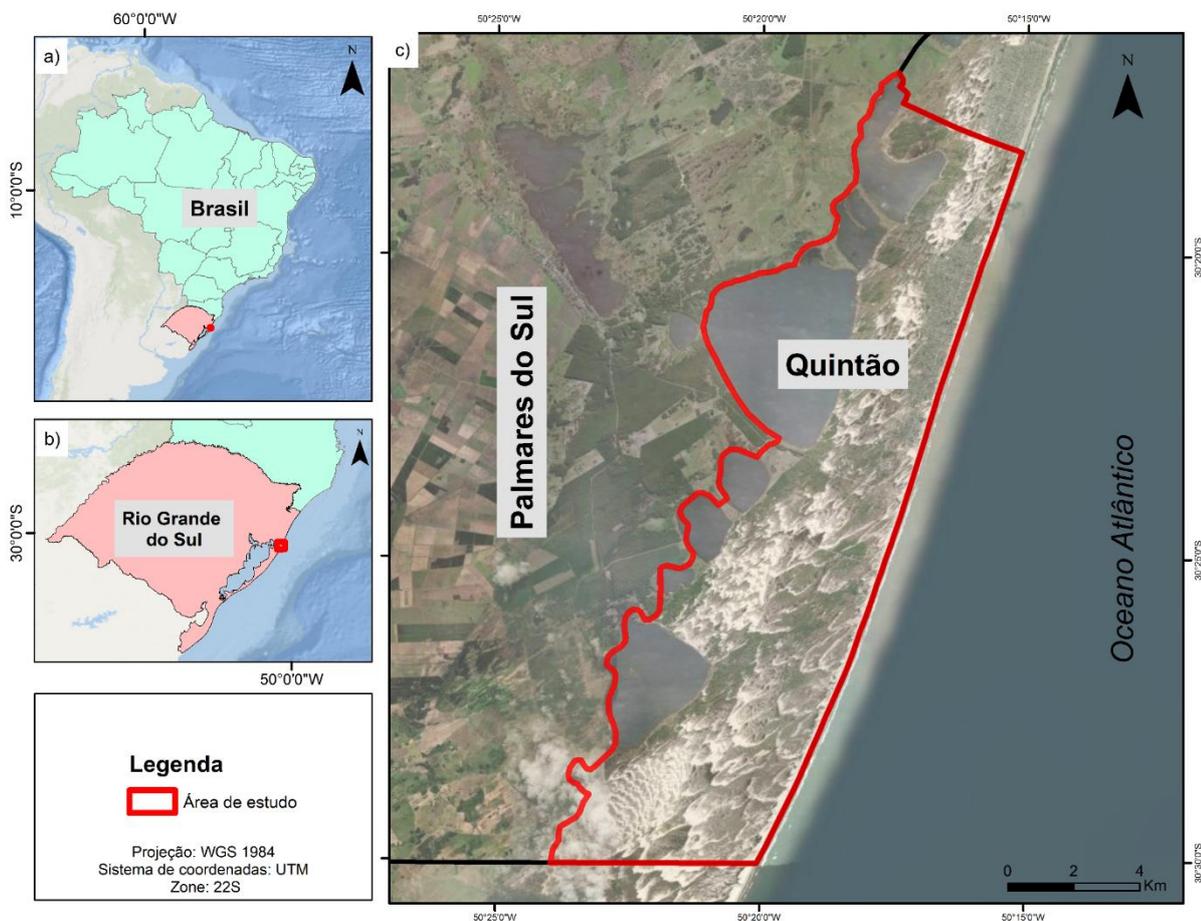


Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Palmares do Sul (c), Estado do Rio Grande do Sul(b), sul do Brasil(a).

O distrito de Quintão possui uma área de 141,17 km² e está situado na bacia hidrográfica do Tramandaí. Geologicamente, o distrito faz parte da unidade geológica denominada "coberturas eólicas holocênicas", caracterizada pela presença de dunas (Ramgrab et al., 2004).

Quanto ao clima, de acordo com Rossato (2011), na região do Litoral Médio, ele é classificado como subtropical II, com maior influência de sistemas polares e interferência tropical marítima, apresentando uma temperatura média anual variando entre 17 e 20°C.

A população estimada na área total do distrito de Quintão é de 3069 habitantes, conforme o último censo disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012).

Conjunto de dados e processamento

Como base, optou-se pelo uso da série de satélites Landsat, devido à extensa série histórica, possibilitando uma análise temporal das mudanças ocorridas desde a década de 1980. Neste caso, a resolução temporal foi priorizada em detrimento da resolução espacial, uma vez que o objetivo principal é avaliar a dinâmica do sistema. As informações das imagens escolhidas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Imagens de satélites utilizados.

Satélite	Órbita/Ponto	Data
Landsat-5	220/081	30/01/1985
Landsat-5	220/081	28/01/1990
Landsat-5	220/081	07/09/1995
Landsat-7	220/081	20/03/2000
Landsat-5	220/081	06/02/2005
Landsat-5	220/081	09/04/2010
Landsat-8	220/081	09/05/2015
Landsat-9	220/081	12/01/2022

No software ArcMap 10.6.1, foram realizadas composições de bandas espectrais, utilizando as bandas Verde, Vermelho e Infravermelho próximo. Essas composições resultaram na combinação RGB432 para as imagens do Landsat 5 e Landsat 7, e RGB543 para as imagens do Landsat 8 e Landsat 9. Essa abordagem possibilitou a identificação dos alvos, melhorando assim a qualidade do processo de classificação das imagens e a identificação das

classes, como exemplificado na Figura 2. A etapa de composição de bandas teve como objetivo otimizar a interpretação visual e a análise quantitativa, contribuindo para uma abordagem mais robusta na caracterização das mudanças no ecossistema de dunas ao longo do período estudado.

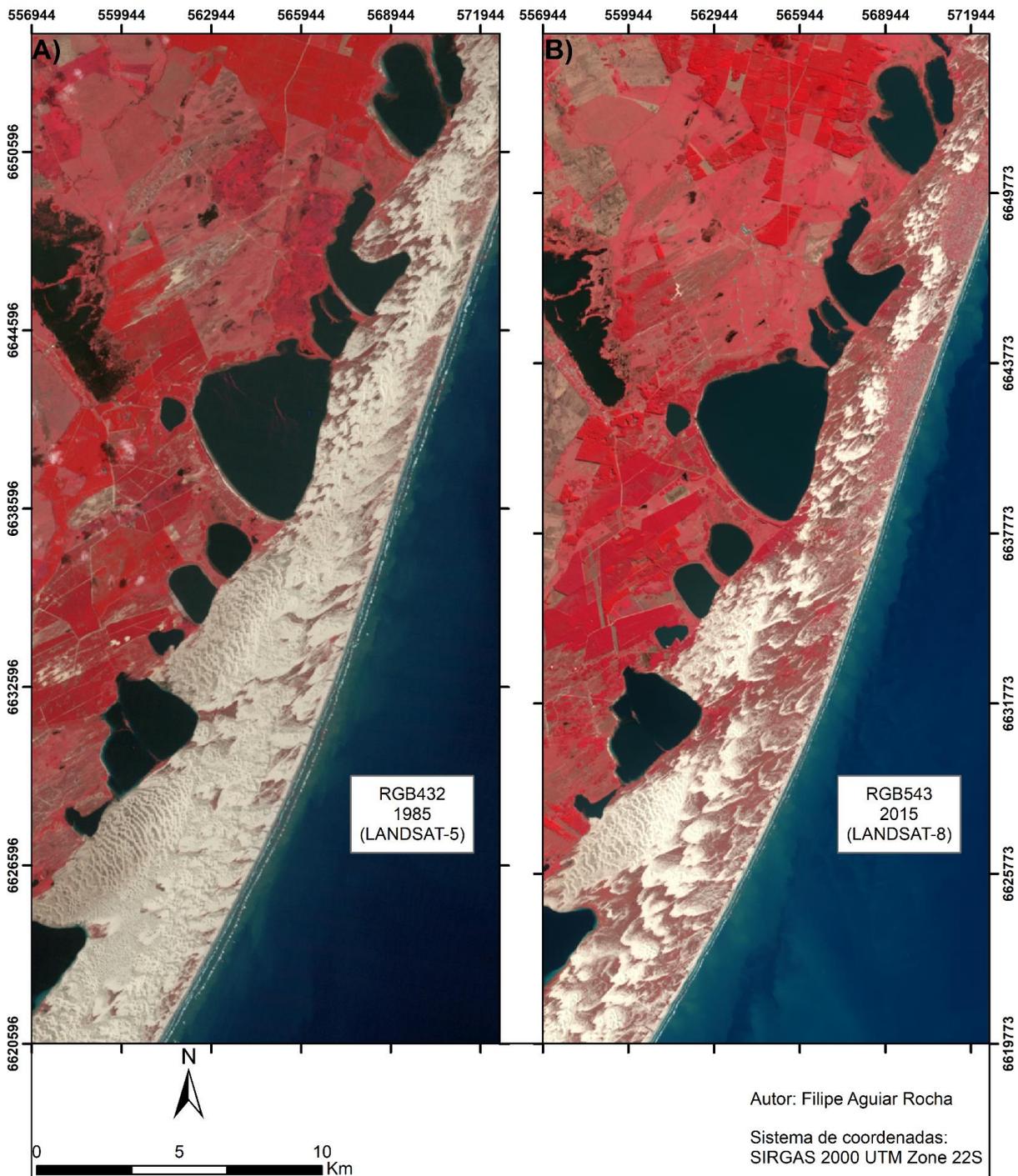


Figura 2 - Composições realizadas para o ano 1985 (A) e 2022 (B).

Além disso, foram elaborados cálculos de bandas espectrais a fim de obter índices para melhor identificação das classes como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Este índice proporciona uma compreensão mais aprofundada da cobertura vegetal, apresentando

dados que variam de -1 a +1. Nessa escala, o valor -1 indica a completa ausência de vegetação, enquanto o valor +1 indica a presença máxima de vegetação. Este índice é muito utilizado para a análise quantitativa e qualitativa da vegetação em diferentes áreas. O NDVI é obtido pixel-a-pixel através da equação:

$$\frac{\text{Infravermelho próximo} - \text{Vermelho}}{\text{Infravermelho próximo} + \text{Vermelho}}$$

As diferentes composições espectrais e o NDVI auxiliaram no processo de identificação das classes de interesse e na classificação das imagens.

Classificação das imagens

A classificação das imagens foi realizada por meio do SIG QGIS 3.30.3. O método de classificação escolhido corresponde à abordagem semiautomática utilizando o plugin Dzetsaka. Esse plugin possibilita uma classificação ágil e concede ao operador a capacidade de selecionar amostras, bem como escolher o método de classificação. Para esta análise, optou-se pelo método de classificação Gaussian Mixture Model, o qual permite modelar distribuições de probabilidade complexas e multimodais. Esse método de classificação é amplamente utilizado para a classificação de imagens.

Para cada uma das imagens, foram gerados polígonos de amostras, correspondentes a cada uma das classes observadas, conforme definido pela chave de interpretação. A média dos polígonos, tamanho e número de pixels podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Polígonos de Amostras

Classe	Polígonos	Tamanho médio (m²) / N^o de pixels
Corpo Hídrico	31	38.390 / 1314
Duna	35	34.030 / 1332
Outra classe	47	19.837 / 1027
Silvicultura	25	1.381 / 37
Urbano	30	9.059 / 605

A chave de interpretação inclui informações sobre cor, tonalidade, textura e formas das classes presentes na superfície (conforme Quadro 2). As classes identificadas abrangem a classe Urbana, que representa áreas urbanas com construções e instalações; a classe Silvicultura, que corresponde a áreas com plantações de árvores como pinus e eucalipto; e a

classe Outras Classes, que engloba áreas com solo exposto, vegetação rasteira ou não vegetada. Além disso, corpos hídricos também foram classificados.

Quadro 2 - Chave de interpretação

RGB(543) Landsat-9	Interpretação	Cor Tonalidade	Elementos de Interpretação	Descrição
	Duna	Branco, Bege	Textura rugosa	Área de Dunas
	Urbano	vermelho claro com cinza.	Textura rugosa, forma regular	Área com construções e domicílios
	Silvicultura	Vermelho escuro	Textura rugosa e forma regular	Área com presença de vegetação plantada
	Outra classe	Vermelho claro	Textura lisa e forma irregular	Área sem presença de vegetação ou com solo exposto ou com presença de vegetação rasteira.
	Corpo Hídrico	Cinza escuro ou preto	Textura lisa e forma irregular	Corpo d' água continental

Após a classificação, os dados obtidos em formato raster, no software Arcmap 10.6.1, passaram pelo processo de transformação de raster para polígono e posteriormente cada uma das imagens geradas passou pelo processo de ajustes da classificação através da utilização das composições coloridas, apoiadas em imagens de melhor resolução espacial como as do Google Earth Pro. Nesta etapa a classificação inicial passou pelo processo de refinamento por fotointerpretação, como reclassificação de polígonos, erroneamente classificados no processo semi-automático assim como ajuste dos vértices. O pós-processamento das imagens classificadas se mostrou importante, devido às variações de tonalidades das classes presentes

nas zonas costeiras. O mesmo tipo de solo quando alagado, ou seco, apresenta respostas espectrais diferentes, muitas vezes passando a ser classificado de forma errônea; neste sentido, realizou-se o ajuste das classes.

Posteriormente, realizou-se o recorte de análise para uma distância de 600 metros da linha de costa em direção ao continente, nesta etapa, foi gerado um buffer de 600m no software Arcmap 10.6.1, a partir da linha de costa e extraídas as informações referentes a esta área. Optou-se por esse recorte, principalmente, para analisar localmente os efeitos das mudanças especialmente nas dunas frontais, aquelas nas quais estão mais próximas da linha de costa e, efetivamente, promovem a proteção da população residente frente aos efeitos das mudanças climáticas, como a maior ocorrência de eventos extremos.

A análise das mudanças deu-se através do modelo de mudança de cobertura e uso da terra, *Land Change Modeler* (LCM) do software TerrSet que permite uma análise detalhada e sistemática das transformações na cobertura e uso do solo ao longo do tempo. Os dados resultantes da classificação foram integrados ao modelo LCM com o propósito de identificar alterações nas classes de interesse. Nesse processo, atribuíram-se valores de 0 às classes não selecionadas, enquanto valores distintos de zero foram atribuídos às classes escolhidas. Dessa forma, foram priorizadas as classes antrópicas presentes na área de estudo, abrangendo as categorias urbano e silvicultura, além da classe referente às dunas.

Acurácia

Através do software Google Earth Pro foram coletados pontos de referência para cada classe identificada e após a coleta, os dados em formato kml foram carregados no software ArcGis 10.6.1.

No total, foram coletados 235 pontos, sendo distribuídos conforme a seguinte seleção: 75 pontos para a classe Duna, 65 para a classe Outra Classe, 45 para a classe Corpo Hídrico, 50 para a classe Urbano e 35 para a classe Silvicultura. Essa variação no número de pontos reflete o tamanho e a distribuição específica de cada classe na área de estudo.

Em etapa subsequente, no software ArcGIS 10.6.1, foram executados os procedimentos para avaliar a acurácia da classificação. Isso envolveu a extração dos dados da classificação para os pontos de referência coletados, utilizando a ferramenta Extract Values to Point. Em seguida, foram obtidos dados de frequência e elaboradas tabelas de Matriz de Confusão, permitindo, por fim, o cálculo da acurácia global e do índice kappa. A distribuição dos pontos estão ilustrados na Figura 3.



Figura 3 – Distribuição de pontos de referência.

No que se refere à acurácia dos dados, os resultados obtidos (Tabela 2) demonstram uma acurácia global de 91,11%, com um índice kappa de 0,885. De acordo com Fonseca (2000), esse índice kappa é considerado excelente.

Tabela 2 – Matriz de confusão

CLASSES	Duna	Corpo Hídrico	Outra Classe	Silvicultura	Urbano	TOTAL
Duna	74	1	1	0	6	82
Corpo Hídrico	0	44	0	0	0	44
Outra Classe	0	0	64	14	1	79
Silvicultura	0	0	0	21	0	21
Urbano	1	0	0	0	43	44
TOTAL	75	45	65	35	50	270
Acurácia Global	91,11%					
Coeficiente Kappa	0,885					

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos indicam um aumento de 993% da classe Urbano ao longo do período de análise, passando de 0,56 km² em 1985 onde representava 0,4% da área total, para 6,12 km² em 2022 passando a representar 4,33% da área total, representando um aumento médio de 0,106% ao ano. Em relação a classe Dunas foi possível observar uma redução de 34,45% em todo período da análise, com uma redução média de 1,29% ao ano, passando de 89,02km² em 1985 onde representava 63,06% da área total, para 58,34km² em 2022 passando a representar 41,33% da área total. Parte das modificações possuem causas naturais, como o regime de ventos e o deslocamento de dunas móveis, enquanto outra parcela responsável pelo decréscimo desse ecossistema é a sua substituição por outras classes através das atividades

antrópicas como a urbanização e atividades de silvicultura. A classe Outras Classes, composta por áreas não vegetadas, solo exposto e vegetação rasteira apresentou um aumento de 220% (Quadro 3).

Quadro 3 - Diferenciação entre as classes (Total)

Classe	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2022	1985 /2022
Urbano	0,56	1,24	1,68	3,61	4,31	5,42	5,79	6,12	+993%
Silvicultura	/	/	0,66	0,42	0,51	0,92	1,29	1,00	/
Outra Classe	12,09	16,80	14,50	19,04	21,42	23,10	36,97	38,71	+220%
Duna	89,02	86,29	82,64	81,02	77,38	70,59	58,98	58,34	-34,45%

Ao examinar o gráfico de mudanças do LCM (Figura 4), é possível observar tanto as perdas quanto os ganhos em km² nas diferentes classes ao longo do período de análise. Destaca-se uma redução expressiva na extensão das dunas, indicando uma perda significativa desse ecossistema ao longo do tempo. Paralelamente, observa-se um notável aumento na área urbana, apontando para uma expansão substancial das zonas urbanizadas durante o mesmo período. Essa análise de perdas e ganhos oferece uma perspectiva abrangente sobre as transformações na cobertura do solo, sendo crucial para compreender as dinâmicas e os impactos das atividades humanas na região estudada.

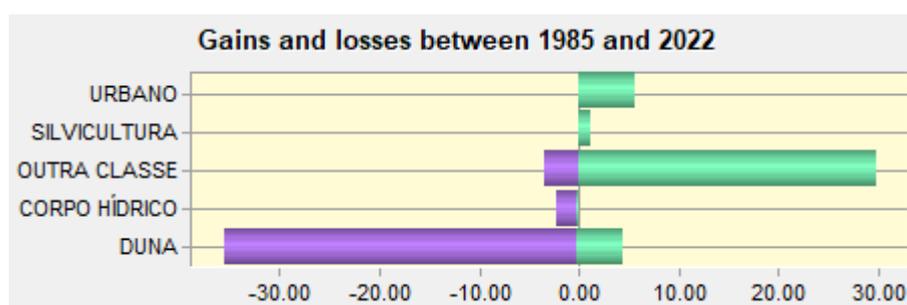


Figura 4 – Mudanças das classes entre 1985 e 2022

Os mapas de classes resultantes da classificação (Figura 5) ilustram as alterações que ocorreram ao longo do período de análise.

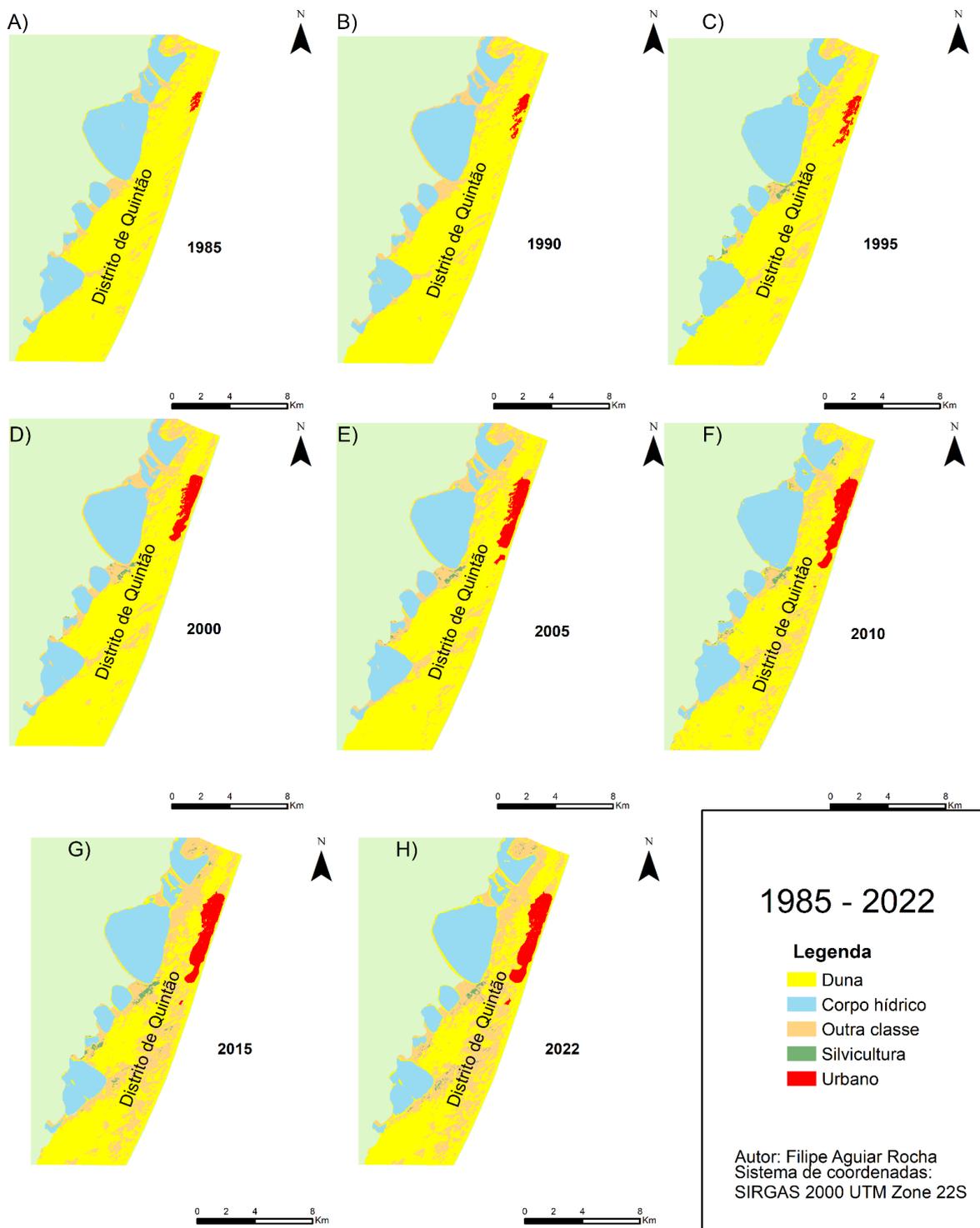


Figura 5 - Mapeamento das classes para o ano 1985 (A), 1990 (B), 1995(C), 2000 (D), 2005 (E), 2010(F), 2015(G) e 2022 (H).

Através da análise qualitativa das imagens, foi possível observar que, na parcela norte do distrito próxima à linha de costa, houve um aumento da urbanização durante o período de análise, ocorrendo de forma contínua ao longo das datas selecionadas para o estudo. Foi possível observar uma expansão acentuada entre 1985 e 2005, e entre 2005 e 2022 um

adensamento entre as regiões urbanas. Esse fenômeno de aumento de urbanização, seguido de adensamento de núcleos urbanos, já havia sido observado por Grabsky et al. (2015) para os balneários de Santa Vitória do Palmar, fundados em meados de 1920, também na costa do Rio Grande do Sul. Os resultados de Grabsky et al. (2015) mostraram que entre os anos de 1964 e 1996, prevaleceu a fase de expansão urbana, caracterizada pelo crescimento territorial da área urbana e, no período entre 1996 e 2010, houve predominantemente um processo de adensamento urbano, indicando uma maior concentração de infraestruturas e atividades em áreas já urbanizadas. Essas observações sugerem que as mudanças na configuração urbana são tendências observadas em diferentes regiões, devido a diversos fatores, como turismo, políticas de desenvolvimento urbano, mudanças nas preferências habitacionais e busca por segundas residências na zona costeira. A Figura 6 detalha as modificações que ocorreram na área total durante o período de análise, sendo possível observar o aumento da área urbana ao longo do período.

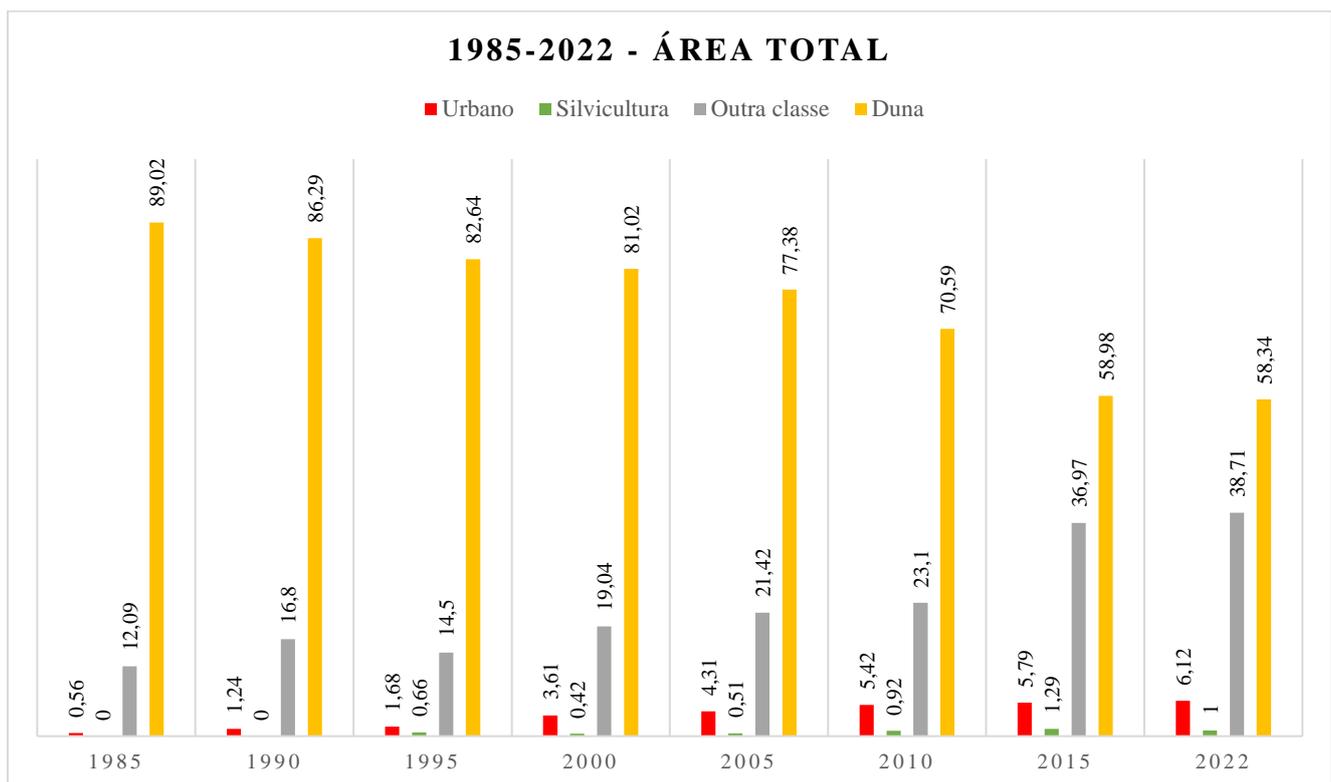


Figura 6 - Diferenciação entre as classes para cada um dos anos de análise.

Grabski et al. (2015), em sua cartografia do crescimento urbano nos balneários Barra do Chuí e Hermenegildo, ambos pertencentes ao município de Santa Vitória do Palmar-RS, durante o período de 1964 a 2010, encontraram valores próximos ao observado neste estudo. Na Barra do Chuí, em 1964, a área urbana representava 2,24% da área em estudo, alcançando 6,22% em 2010. Já no Hermenegildo, a área urbana abrangia 0,65% em 1964 e expandiu para 5,98% em 2010. Os índices médios de crescimento anual para esses dois balneários foram, respectivamente, 0,087% e 0,12%. Já Sfredo & Silveira (2016), em sua análise sobre a

ocupação do espaço urbano antrópico no município de São José do Norte-RS, quantificaram que, em 1964, a parcela percentual desta categoria correspondia a 2,24% da área total mapeada, aumentando para 6,61% em 2015. O índice médio de crescimento anual identificado foi de 0,086%.

Em relação ao Distrito de Quintão, ROCHA (2022) realizou uma análise temporal das alterações antrópicas e seus impactos no sistema de dunas do distrito entre os anos de 2002 e 2022. Como resultado, observou um aumento de 334,55% da área das classes de impacto durante o período de análise. Especificamente em relação a expansão urbana, observou um aumento da urbanização passando de 4,44km² para 7,01 km² em 2022, representando um índice médio de crescimento urbano anual de 0,133%. ROCHA (2022) destaca que as mudanças estão ligadas especialmente pela substituição dos sistema de dunas pela classe urbana.

É possível observar a semelhança entre os resultados encontrados pelos outros autores e os resultados nesta pesquisa, em que, mesmo com métodos distintos, Grabsky et al (2015) e Sfredo & Silveira (2016) com a utilização de fotografias aéreas em seus estudos, e ROCHA (2022) com classificação por interpretação visual, os resultados encontrados para o índice de crescimento urbano anual foram semelhantes, mostrando que as imagens Landsat associadas a classificação semiautomática utilizada no trabalho possibilitaram uma análise com resultados satisfatórios. Além disso, a semelhança entre os trabalhos de Grabsky et al (2015) e Sfredo & Silveira (2016) com esta pesquisa, é explicada devido a todos os balneários que foram analisados nestes estudo contarem com características similares como balneários pequenos, casas utilizadas como segunda residência e frequentados por moradores das proximidades.

De forma a refinar a análise, com o intuito de identificar especialmente as alterações que ocorreram nas proximidades da linha de costa e conseqüentemente afetam o sistema de dunas frontais, realizou-se um buffer de 600 metros a partir da linha de costa. Os dados obtidos indicam que, dentro da área total do buffer (13,95 km²), ocorreu um aumento de 547,5% da área urbana ao longo do período de análise, passando de 0,40 km² em 1985, representando 2,88% da área, para 2,59km² em 2022, o que representa 18,56% da área. Esse valor corresponde a um aumento médio de 18,54% ao ano.

Tratando apenas de dunas frontais em Quintão, quando analisado através do buffer, foi observado uma redução de 27,75%, passando de 10,74 km² em 1985 representando 76,96% da área, para 7,76 km² em 2022 representando 55,6 % da área, conforme o Quadro 4.

Quadro 4 - Diferenciação entre as classes (600m)

Classe	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2022	1985/2022
Urbano	0,40	0,76	0,83	1,62	2,20	2,53	2,59	2,59	547,5%
Outra Classe	1,32	1,14	1,56	1,33	1,34	2,00	2,80	2,37	79,55%
Duna	10,74	10,73	10,37	9,11	9,10	7,81	7,23	7,76	27,75%

A redução de 2,94 km² de área de dunas frontais e o aumento de 2,19% da área urbana, indicam uma substituição da classe Duna para classe Urbano. É fundamental destacar que, como já abordado, essas tendências não são isoladas, e múltiplos fatores podem interagir de maneira complexa, moldando a paisagem urbana de forma única.

O estudo de Sfredo & Tagliani (2016) para Rio Grande, também no sul do estado, evidencia que o crescimento urbano sem planejamento, e sobre a classe de dunas, é uma realidade em diferentes regiões. No contexto de Rio Grande, destaca-se que a classe dunas revelou-se como o ambiente que mais cedeu espaço ao uso urbano, totalizando 33,45% de sua área. Observou-se uma significativa redução dessa classe, passando de 16,98% para 1,20% da área mapeada ao longo do período analisado. Essa transformação representa uma diminuição percentual anual de 0,24%. Estes dados indicam uma notável pressão urbana sobre as áreas de dunas, refletindo possíveis mudanças nas práticas de ocupação e uso do solo em Rio Grande ao longo do tempo.

Quando se trata de estudos de caso mais específicos na costa do Rio Grande do Sul, merece destaque a pesquisa realizada nos arredores da Lagoa Paurá, em São José do Norte, RS, por Lipp-Nissinen et al. (2018). Os pesquisadores identificaram uma redução significativa na extensão da classe de dunas, passando de 702 hectares em 1985 para 409 hectares em 2011. Essa análise foi conduzida por meio de imagens de satélite Landsat. A diminuição observada representa uma queda expressiva de 42% ao longo desse período, correspondendo a uma taxa anual média de redução de 1,61%. Esses resultados ressaltam uma transformação notável nas características da paisagem nos arredores da Lagoa Paurá. Tal transformação sugere uma pressão contínua sobre a classe de dunas, possivelmente influenciada por fatores como o desenvolvimento urbano, atividades humanas e mudanças ambientais.

O aumento da área urbana sobre as dunas acaba impactando diretamente o ecossistema dessas áreas. Em regiões com dunas móveis, existe a possibilidade de soterramento de residências instaladas nas áreas do sistema de dunas, conforme ilustrado na Figura 7.

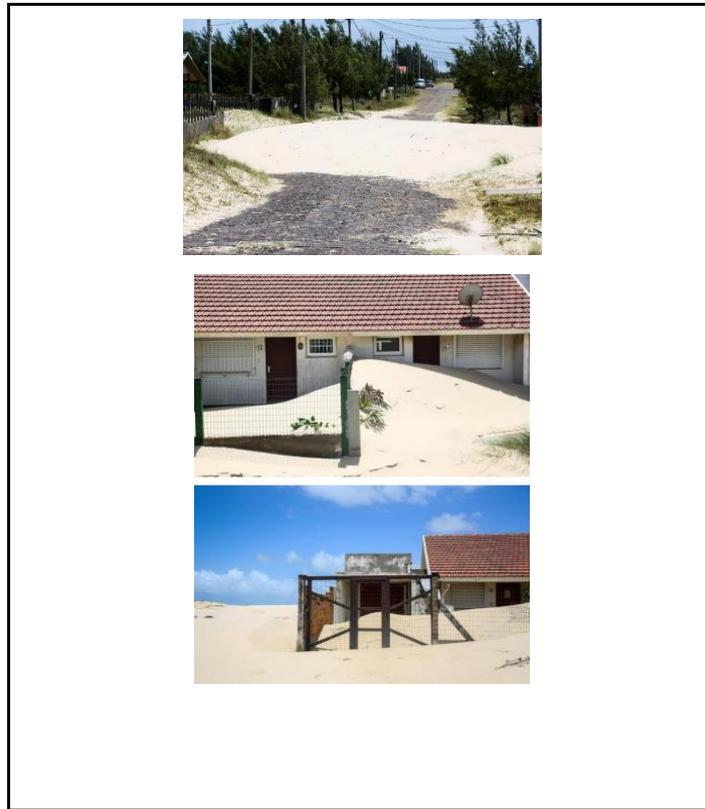


Figura 7 - Avanços das dunas sobre as residências.

Fonte: Marco Favero/GZH-Agência RBS (2020)

Além disso, a redução das áreas de dunas frontais aumenta a exposição da população residente a eventos de inundação, uma vez que as dunas desempenham um papel essencial como barreiras naturais. Elas são fundamentais para conter o avanço do mar em eventos como tempestades meteorológicas e ressacas marítimas, cuja recorrência tem aumentado devido às mudanças climáticas. Neste sentido, destaca-se a importância de analisar as mudanças de uso e cobertura da terra em áreas próximas à linha de costa, com a ocorrência de dunas frontais. As mudanças das classes ao longo do período de análise, levando em consideração o *buffer* de 600m a partir da linha de costa podem ser observadas na Figura 8.

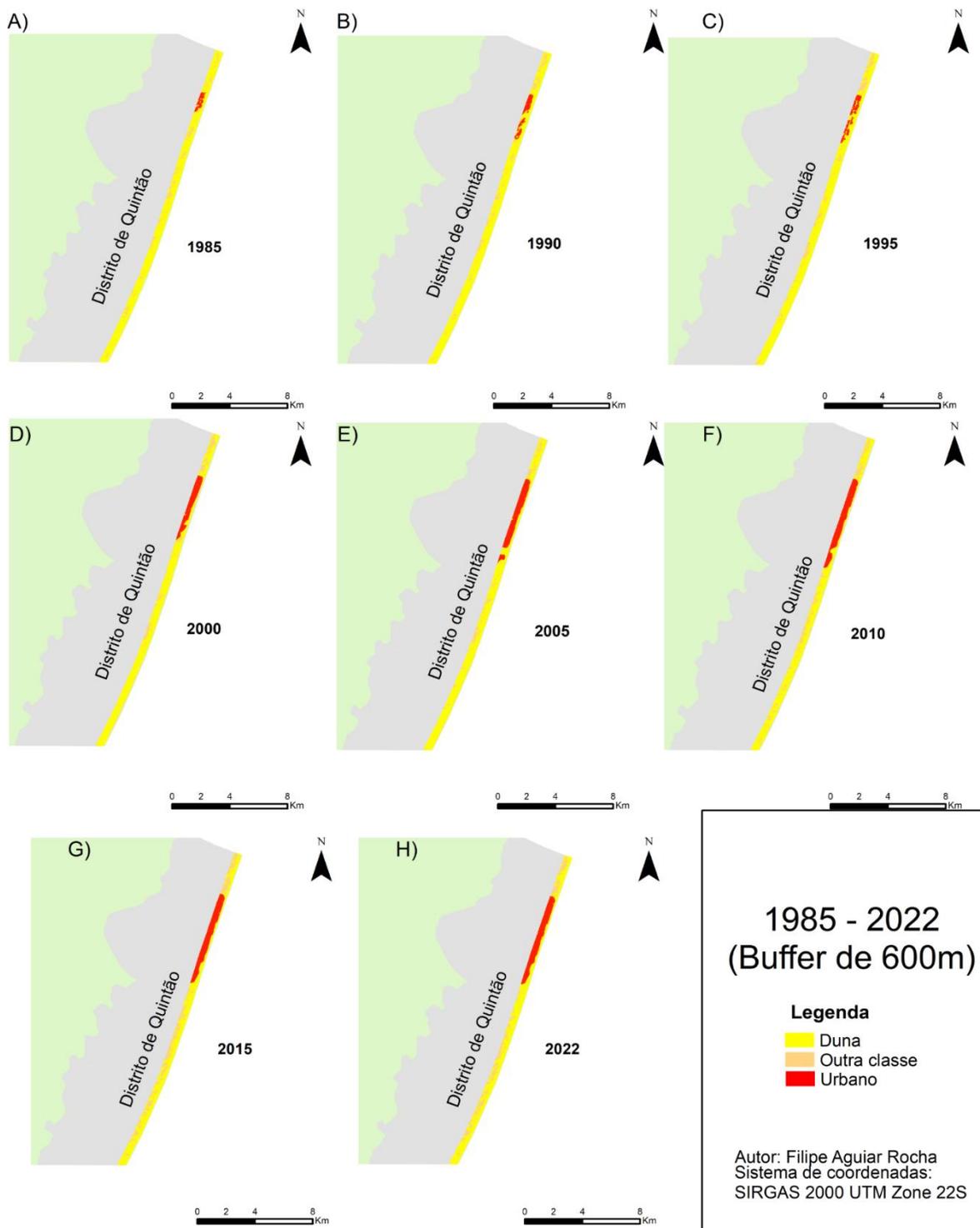


Figura 8 - Mapeamento das classes em um buffer de 600m da linha de costa para o ano 1985 (A), 1990 (B), 1995(C), 2000 (D), 2005 (E), 2010(F), 2015(G) e 2022 (H).

Por meio da Figura 8, torna-se evidente o crescimento da área urbana e a diminuição das dunas ao longo do período de análise. Essa substituição é particularmente notável ao norte do distrito, onde há uma concentração significativa da área urbana. Através da Figura 9, é possível observar as alterações que ocorreram na área.

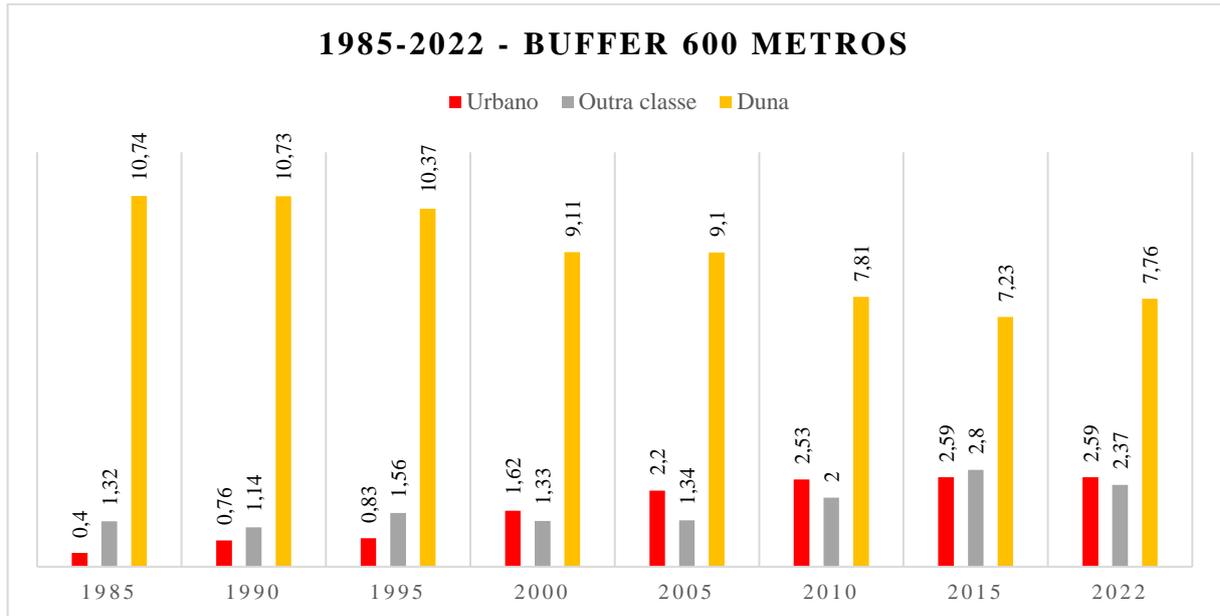


Figura 9 - Diferenciação entre as classes para cada um dos anos de análise relacionados a um buffer de 600m da linha de costa.

Tanto a análise da área total, quanto a análise do buffer, indicam a mesma tendência: a substituição da classe Duna pela classe urbana. No entanto, outras dinâmicas de alterações e mudanças foram observadas no período de estudo, como, por exemplo, a substituição da classe Duna pela classe Outra Classe. Ao comparar isoladamente os anos de 1985 e 2022, podemos visualizar o resultado das alterações ao longo desse período (Figura 10). Esta análise torna-se particularmente importante quando se busca identificar as modificações que ocorreram ao longo do tempo. A utilização do Land Change Modeler, com a inserção dos dados mais antigos (1985) e mais recentes (2022), permite a obtenção de informações específicas relacionadas às alterações que ocorreram ao longo desse período (CLARK LABS, 2023).

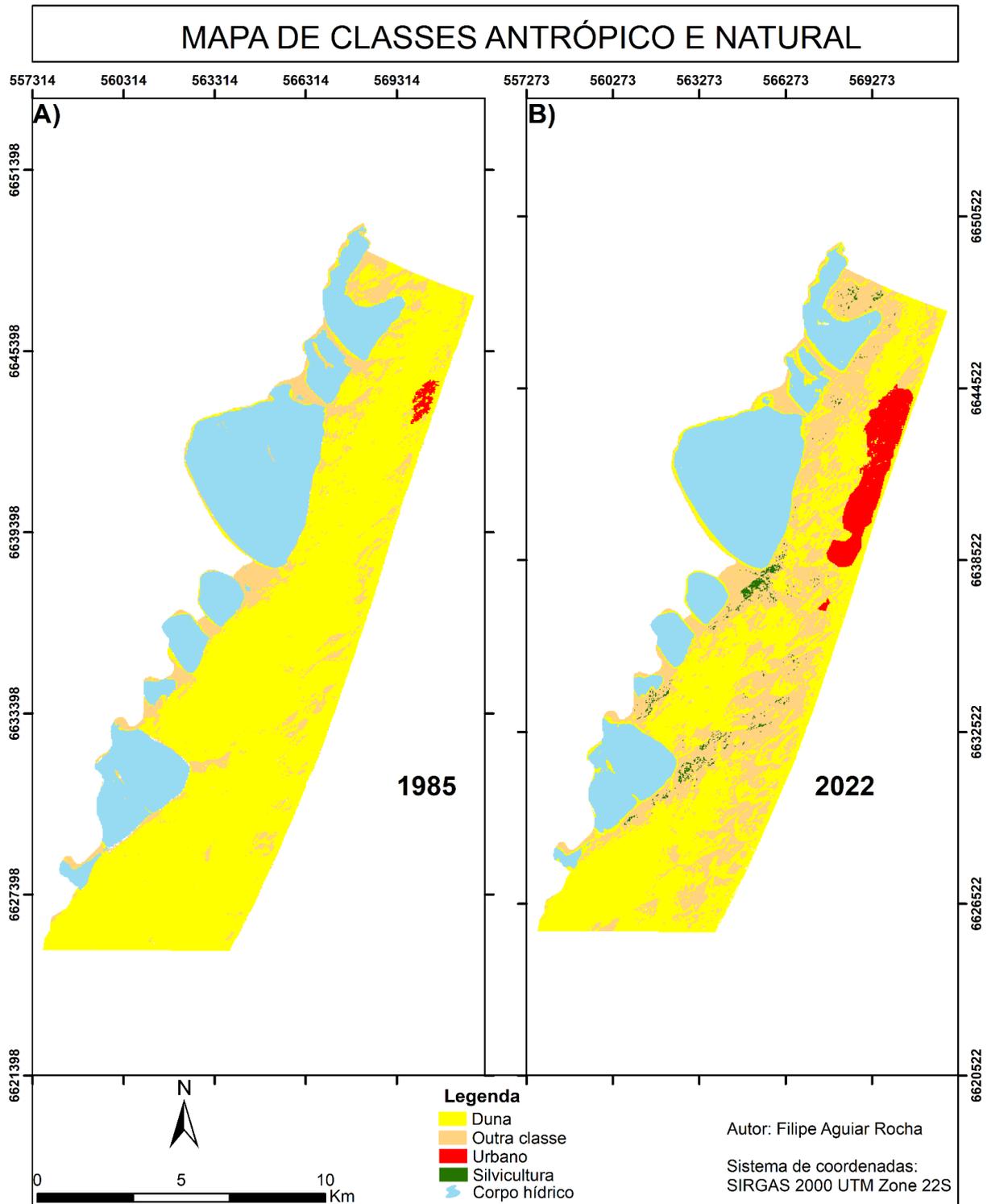


Figura 10 - Diferenciação entre as classes entre 1985 e 2022.

A partir da análise de mudanças de uso e cobertura da terra através da ferramenta Land Change Modeler do software TerrSet, foi possível analisar as mudanças das classes, os dados relacionados à transição e os dados relacionados a persistência das classes ao longo do período de análise (Figura 11).

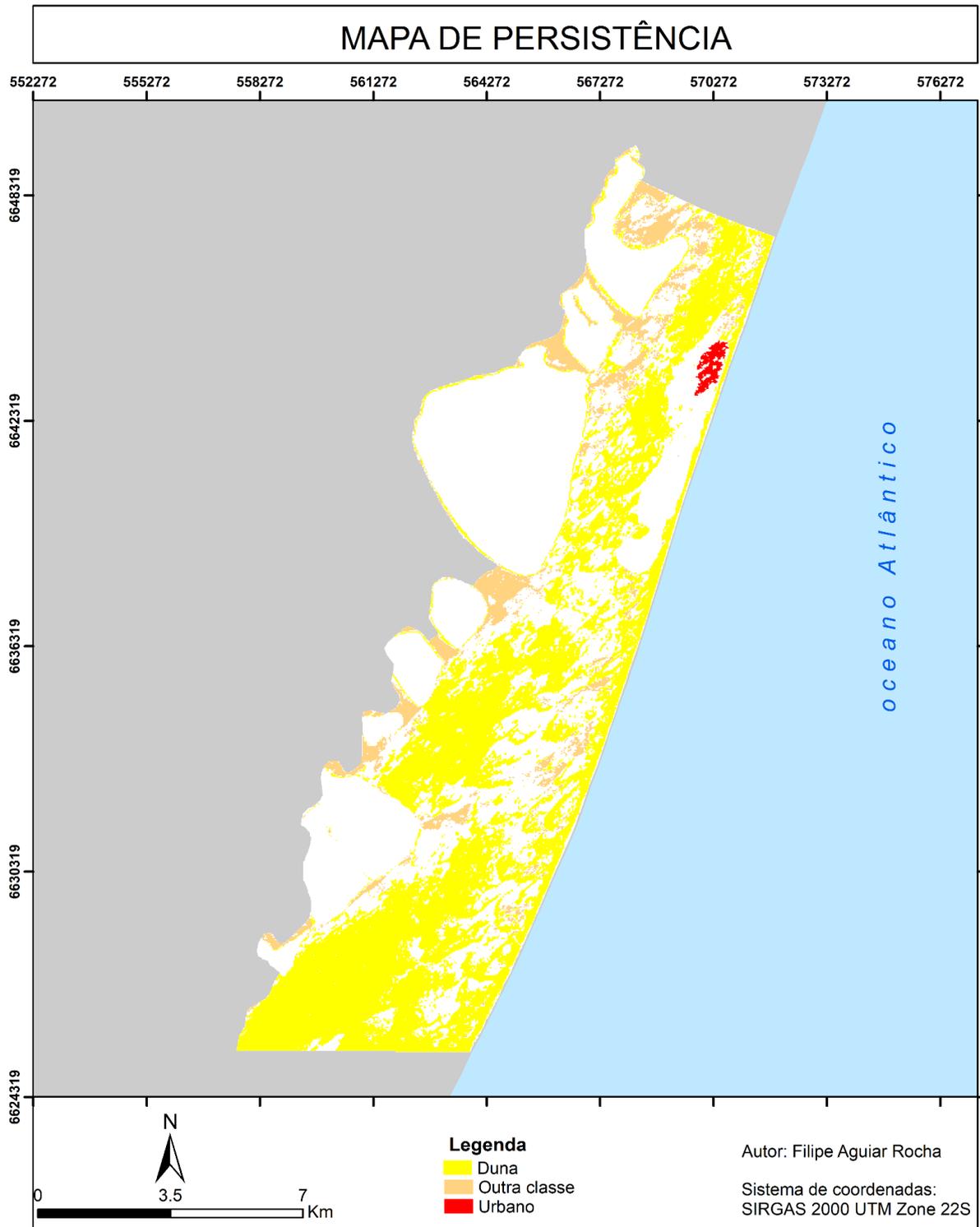


Figura 11 - Mapa de persistência entre as classes entre 1985 e 2022.

Em relação ao mapa de persistência (Figura 11) é possível observar as áreas que permaneceram inalteradas entre 1985 e 2022. Em amarelo é possível observar as dunas que se mantiveram inalteradas, em rosa claro temos a classe Outras Classes e em vermelho a área urbana que se manteve inalterada ao longo do período de análise.

Em relação ao mapa de alterações entre as classes (Figura 12), podem ser identificadas as áreas que sofreram modificações ao longo do tempo, destacando as transições entre as diferentes classes.

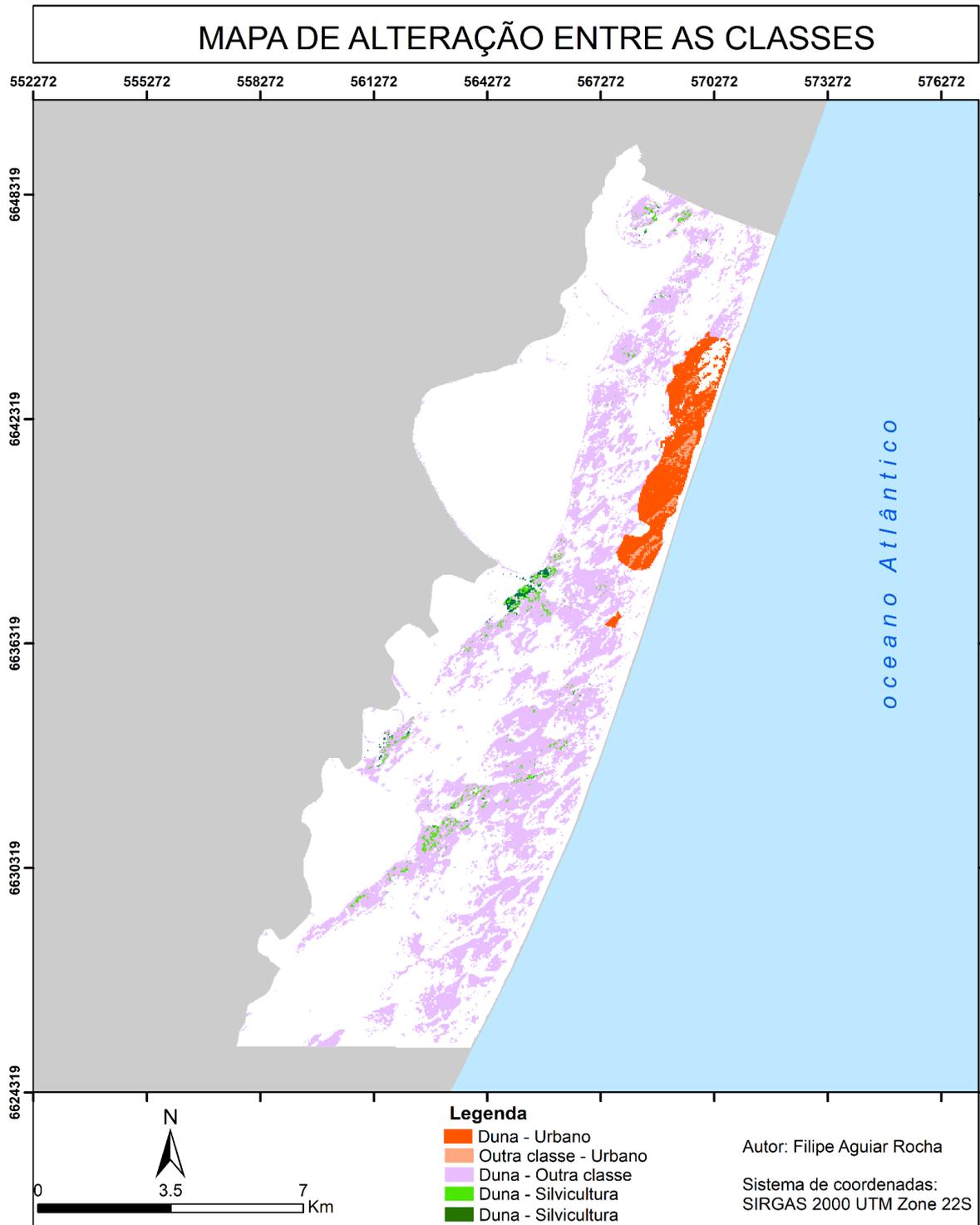


Figura 12 - Alteração entre as classes entre 1985 e 2022.

Em laranja escuro, destaca-se a substituição das áreas de dunas pela classe "Urbano". Ao norte do distrito, onde se concentra a área urbana, é possível identificar as regiões que passaram por alterações mais significativas, especialmente devido ao aumento da área urbana e sua intensificação sobre o sistema de dunas. Em cinza, são evidenciadas as áreas que sofreram alteração da classe Duna para a classe Outra Classe, correspondendo às áreas de dunas que passaram a ser vegetação rasteira, solo exposto, ou área não vegetada.

É possível observar estas alterações através dos gráficos de alteração individual das classes. Em relação a classe Duna observa-se a sua substituição pela área urbana e por Outra Classe. Essa substituição evidencia as transformações substanciais que ocorreram ao longo do tempo, com a expansão da área urbana sobre as áreas anteriormente ocupadas por dunas, além da conversão das áreas de dunas em áreas de solo exposto, áreas não vegetadas ou com vegetação rasteira (Figura 13).

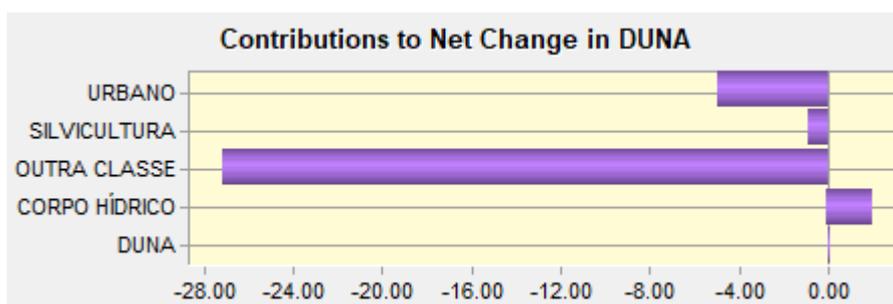


Figura 13 – Gráfico de alterações da classe Duna

No gráfico da classe Urbano, é perceptível que sua principal alteração ocorreu na classe Duna. Ou seja, as áreas que anteriormente eram ocupadas por dunas ao longo do tempo passaram a ser incorporadas pela classe Urbano, refletindo o avanço da urbanização e o adensamento das áreas urbanas (Figura 14).

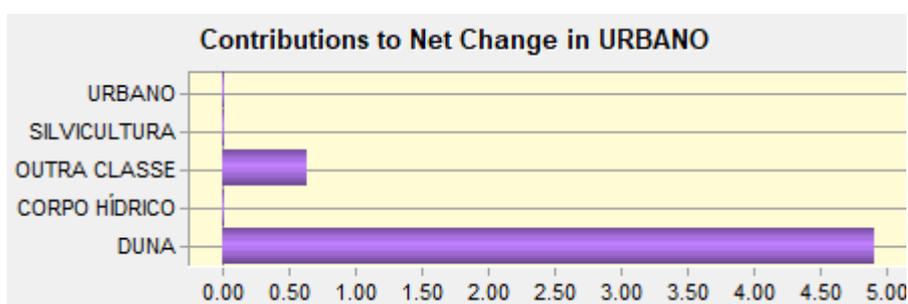


Figura 14 – Gráfico de alterações da classe Urbano

Em relação ao gráfico da classe Outra classe, observa-se a conversão das dunas para esta classe ao longo do período de análise, alterando de área de dunas, para ambientes de solo exposto, de vegetação rasteira ou de outras áreas não vegetadas (Figura 15).

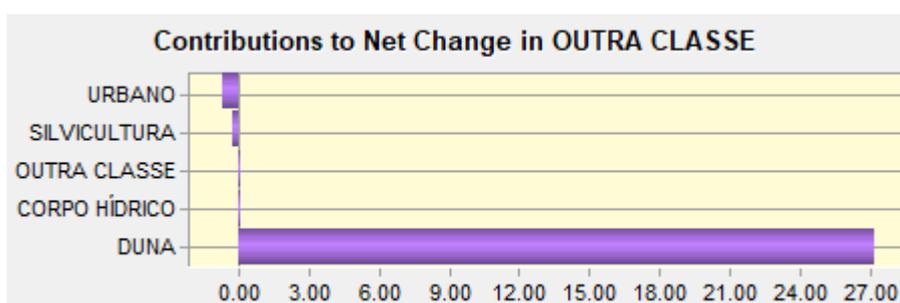


Figura 15 – Gráfico de alterações da classe Outra classe

Através do gráfico da classe Silvicultura é possível observar a substituição da classe Duna e da classe Outra Classe pela Silvicultura (Figura 16).

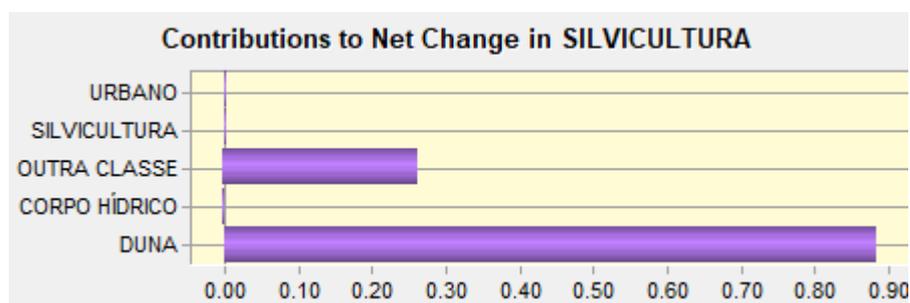


Figura 16 – Gráfico de alterações da classe Silvicultura

Os resultados obtidos neste trabalho indicam as alterações que ocorreram ao longo do tempo e as características de alteração das classes, possibilitando uma melhor compreensão da dinâmica de alteração no ecossistema de dunas entre 1985 e 2022. A compreensão dessas transformações auxiliam no embasamento de estratégias de manejo e conservação, visando a preservação desse ecossistema costeiro e a mitigação de potenciais impactos adversos associados às atividades humanas.

CONCLUSÕES

A interligação entre a legislação ambiental, representada pelo PNGC, e a demografia da população costeira destaca a necessidade de políticas públicas integradas que visem não apenas a preservação ambiental, mas também o bem-estar e a segurança das comunidades costeiras. O aumento populacional nessas regiões demanda uma abordagem holística que considere não apenas a conservação dos recursos naturais, mas também o planejamento urbano, a resiliência às mudanças climáticas e a promoção do desenvolvimento sustentável.

Essa interação complexa entre o aumento populacional e as mudanças nos ambientes costeiros destaca a necessidade premente de intervenções sustentáveis e estratégias de gestão eficazes para mitigar os impactos negativos e promover a conservação ambiental nessas áreas sensíveis. Com base nos resultados alcançados, tornou-se evidente que as áreas mais impactadas ao longo do tempo são as dunas, especialmente relacionadas com a expansão urbana e a substituição das áreas de dunas por áreas urbanas. Tornando-se mais evidente esta alteração quando analisado em um buffer de 600m da linha de costa, onde temos maior interferência nas dunas frontais.

Nesse sentido, o conhecimento aprofundado sobre as transformações no uso da terra não apenas oferece uma perspectiva valiosa sobre a evolução dessas regiões, mas também estabelece uma base sólida para implementar estratégias que busquem conciliar o

desenvolvimento humano com a conservação dos ecossistemas marinhos e costeiros. Isso é essencial para assegurar não apenas a preservação dos habitats naturais, mas também a continuidade dos serviços ecossistêmicos essenciais para a proteção das áreas costeiras.

A assertiva de Villwock (1984) de que é necessário identificar os processos estressores e/ou impactantes que incidem sobre os ecossistemas na zona costeira continua válida. A partir dos resultados atuais para Quintão, percebe-se que a conservação e eventual restauração dos ecossistemas costeiros devem permanecer como preocupações constantes da sociedade, uma vez que, além da manutenção dos processos previamente identificados, surgem novos desafios decorrentes de formas emergentes de uso e ocupação do espaço.

Os resultados deste estudo reiteram a imperatividade da gestão dos ecossistemas naturais em regiões costeiras. O reconhecimento das modificações nesses ambientes fornece uma base para o planejamento do desenvolvimento urbano e a implementação sustentável das áreas naturais. Em um período marcado por significativas transformações socioeconômicas, o planejamento urbano assume uma importância crucial. Neste contexto, torna-se essencial determinar a orientação a ser adotada em relação à utilização dos recursos naturais costeiros.

Com base no exposto e diante das alterações ambientais identificadas decorrentes do crescimento urbano, propõe-se a implementação de um monitoramento contínuo da supressão de ambientes naturais em Quintão. Essa medida visa não apenas à preservação das dunas como parte fundamental do ecossistema costeiro, mas também a mitigação dos impactos negativos associados ao avanço urbano desordenado.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRAKIS, George et al. Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. *Ocean & Coastal Management*, v.11, p.1-11, 2015.

BARRAGÁN, J. M., & **ANDRÉS**, M. 2015. Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean & Coastal Management*, 114: 11 -20

CALLIARI, Lauro Julio; **FIGUEIREDO**, Salette Amaral de. Sangradouros: distribuição espacial, variação sazonal, padrões morfológicos e implicações no gerenciamento costeiro. 2005.

CLARK LABS, Land Change Modeler in TerrSet, Disponível em: <https://clarklabs.org/terrset/land-change-modeler/> Acesso em: 07/2023

DAILY, G. C. (1997). Introduction: what are ecosystem services? Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems.

GRABSKI, Kledson Róber et al. Estudo da dinâmica da urbanização e seus impactos sobre ambientes costeiros baseado em Sensoriamento Remoto e SIG. Caso do município de Santa Vitória do Palmar, RS. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto–SBSR, 2015.

GZH, Agência RBS website: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/comportamento/verao/noticia/2020/02/engolidos-pela-areia-as-dunas-moveis-que-cobrem-ruas-e-casas-no-litoral-norte-ck69okz1y0gjw01qd3ynkmnun.htm>. Acesso em 12/2023

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil, / IBGE, Diretoria de Geociências. - Rio de Janeiro,176p. 2011.

LANDRYA, Craig E. et al. Economic Values of Coastal Erosion Management: Joint Estimation of Use and Existence Values with recreation demand and contingent valuation data. *Journal of Environmental Economics and Management*, v.103, p.1-17, 2020.

LIPP-NISSINEN, Katia Helena et al. Temporal dynamics of land use and cover in Paurá Lagoon region, Middle Coast of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. *J. Integr. Coast. Zone Manag*, v. 18, p. 25-35, 2018.

MORAES, Antonio Carlos Robert. Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil. São Paulo : Hucitec, 1999.

RAMGRAB, G. E. et al. Folha SH. 22-Porto Alegre. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília (CD-ROM), 2004.

REIS, E. G., TAGLIANI, C. R., ASMUS, M. L., CALLIARI, L. J., & BERGESCH, M. (2002). The TRAIN-SEA-COAST Programme: new challenges for the development of human resources on coastal and ocean management in Brazil. *Ocean & coastal management*, 45(9-10), 667-676.

ROCHA, F.A. (2022). Mapeamento e análise do uso do solo sobre o sistema de dunas do distrito de Quintão, Palmares do Sul - RS , Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

ROSSATO, Maíra Suertegaray. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. 2011.

SCHERER, Marinez; **SANCHES**, Manuel; **NEGREIROS**, Dora Hees de. Gestão das zonas costeiras e as políticas públicas no Brasil: um diagnóstico. Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Un diagnóstico. Necesidad de Cambio. Cádiz: Red IBERMAR (CYTED), p. 291-336, 2010.

SFREDO, Giuliana Andréia; TAGLIANI, Carlos Roney Armanini. Análise das modificações ambientais decorrentes da ocupação urbana em Rio Grande, RS, entre 1947 e 2014, por meio de um Sistema de Informações Geográficas. *Desenvolvimento e Meio ambiente*, v. 38, 2016.

SILVA, Tatiana Silva da; TAGLIANI, Paulo Roberto Armanini. Mudanças na cobertura e uso do solo nos entornos da lagoa dos patos: além da dimensão física. 2010.

VILLWOCK, J. A. (1984). Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. *Pesquisas em Geociências*, 16(16), 5-49.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação a proposta deste trabalho visando discutir as hipóteses estabelecidas inicialmente, foi observado no decorrer da pesquisa que a inserção no IVC de dados dos sangradouros, juntamente com os dados socioeconômicos e biogeofísicos, auxiliaram em um Índice de Vulnerabilidade Costeira mais completo dos que usualmente utilizados. Mostrando-se a importância da adaptação do índice para localidades com a presença de sangradouros, especialmente no Sul do Brasil. A metodologia apresentada no trabalho pode ser replicada em outras áreas com a presença de sangradouros na costa, porém recomenda-se a adaptação do modelo para as realidades locais. Além disso, observou-se o aumento exponencial da urbanização especialmente sobre o sistema de dunas móveis, o que acarreta na diminuição das dunas e consequente aumento de exposição da população aos riscos associados às mudanças climáticas e aumento de eventos extremos como a maior ocorrência de tempestades e ressacas.

Ao analisarmos de forma conjunta os dois artigos desenvolvidos, podemos entender que o aumento populacional, especialmente na região norte do Distrito de Quintão, contribuiu para a redução das dunas ao longo do tempo. A redução das dunas nesta região acarretou em maior exposição da população ao risco de inundação e erosão, conforme destacado no artigo 1.

Neste sentido, destaca-se a importância de medidas que mitiguem o impacto do aumento populacional sobre o ecossistema de dunas acarretando no aumento da vulnerabilidade costeira.

Além disso, espera-se que este trabalho possa subsidiar estudos voltados para a vulnerabilidade costeira especialmente para as localidades com a presença de sangradouros.

FINANCIAMENTO

Tem-se como fonte de financiamento para este estudo a bolsa de mestrado concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

ALEXANDRAKIS, George; MANASAKIS, Constantine; KAMPANIS, Nikolaos A. Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. *Ocean & Coastal Management*, v. 111, p. 1-11, 2015.

BARRAGÁN, Juan Manuel; DE ANDRÉS, María. Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean & Coastal Management*, v. 114, p. 11-20, 2015.

BRASIL, Lei Nº 7.661, de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7661.htm Acesso em: 11/2023.

CALLIARI, Lauro Julio; FIGUEIREDO, Salette Amaral de. Sangradouros: distribuição espacial, variação sazonal, padrões morfológicos e implicações no gerenciamento costeiro. 2005.

CEPAL, N. U. et al. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: impactos. 2012.

CLARK LABS, Land Change Modeler in TerrSet, Disponível em:
<https://clarklabs.org/terrset/land-change-modeler/> Acesso em: 07/2023

DAILY, Gretchen C. (Ed.). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island press, 1997.

GOOGLE Earth website. <http://earth.google.com/>, 2023.

GORNITZ, Vivien. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 89, n. 4, p. 379-398, 1991.

GZH - Agência RBS website.

<https://gauchazh.clicrbs.com.br/comportamento/verao/noticia/2020/02/engolidos-pela-areia->

as-dunas-moveis-que-cobrem-ruas-e-casas-no-litoral-norte-ck69okz1y0gjlw01qd3ynkmmun.htm.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011). Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil, / IBGE, Diretoria de Geociências. - Rio de Janeiro, 176p. 2011.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Geomorfologia, Folha Palmares do Sul SH-22-ZA. Escala, v. 1, p.250.000, 2003. Disponível em https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geomorfologia/mapas/escala_250_mil/sh22_za_geomorfologia_2003.pdf Acesso em: 04/2023

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/eventos-extremos-chuvas-intensas-no-norte-nordeste-e-sul-marcam-junho-de-2023>. Acesso em: 07/2023.

IOC, Intergovernmental Oceanographic Commission et al. Hazard awareness and risk mitigation in integrated coastal area management. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2009.

IPCC , Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

LANDRYA, Craig E. et al. Economic Values of Coastal Erosion Management: Joint Estimation of Use and Existence Values with recreation demand and contingent valuation data. *Journal of Environmental Economics and Management*, v.103, p.1-17, 2020.

MARENGO, Jose Antonio; SOARES, Wagner Rodrigues. Impacto das mudanças climáticas no Brasil e possíveis futuros cenários climáticos: síntese do terceiro relatório do IPCC 2001. *Clima e Recursos Hídricos*, p. 209-233, 2003.

MORAES, Antonio Carlos Robert. Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil. São Paulo : Hucitec, 1999.

NGUYEN, Thang T.X. et al. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: a review of concepts, approaches and vulnerability indices. *Ocean Coastal Management*. 123, p.18-23, 2016.

NICOLODI, João Luiz; PETERMANN, Rafael Mueller. Potential vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social, and technological aspects. 2010.

PARTHASARATHY, Anitha; NATESAN, Usha. Coastal vulnerability assessment: a case study on erosion and coastal change along Tuticorin, Gulf of Mannar. *Natural Hazards*, v. 75, p. 1713-1729, 2015.

PEREIRA DA SILVA, R. Ocorrência, distribuição e características morfodinâmicas dos sangradouros na zona costeira do Rio Grande do Sul: trecho Rio Grande-Chuí, RS. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

PEREIRA DA SILVA, R.; CALLIARI, L. J. Erosão costeira causada por sangradouros ao longo do litoral sulriograndense: Trecho Rio Grande-Chuí. In: VI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário e Reunião sobre o Quaternário da América do Sul. Resumos expandidos. 1997. p. 420-423.

PONTEE, N. et al. What is coastal squeeze? Final Report, Project FRS17187. 2021.

PORTZ, Luana Carla. Contribuição para o estudo do manejo de dunas: caso das praias de Osório e Xangrilá, litoral norte do Rio Grande do Sul. 2008.

RAMGRAB, G. E. et al. Folha SH. 22-Porto Alegre. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília (CD-ROM), 2004.

REIS, Enir Girondi et al. The TRAIN-SEA-COAST Programme: new challenges for the development of human resources on coastal and ocean management in Brazil. *Ocean & coastal management*, v. 45, n. 9-10, p. 667-676, 2002.

ROCHA, Filipe Aguiar (2022). Mapeamento e análise do uso do solo sobre o sistema de dunas do distrito de Quintão, Palmares do Sul - RS , Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

ROSSATO, Maíra Suertegaray. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. 2011.

SCHERER, Marinez; SANCHES, Manuel; NEGREIROS, Dora Hees de. Gestão das zonas costeiras e as políticas públicas no Brasil: um diagnóstico. *Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Un diagnóstico. Necesidad de Cambio*. Cádiz: Red IBERMAR (CYTED), p. 291-336, 2010.

SERPA, Christian Garcia. Estudo da influência dos fatores climáticos e hidrológicos no ciclo morfodinâmico praias de um sangradouro intermitente, praia do Cassino, Brasil. 2008.

Dissertação de Mestrado.

SFREDDO, Giuliana Andréia; DA SILVA, Tatiana Silva; BARBOZA, Eduardo Guimarães. Assessment of local coastal vulnerability based on a global model: A case study in Jaguaruna, southern Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, v. 61, p. 102824, 2023.

SHARP, Richard et al. InVEST user's guide. The Natural Capital Project: Stanford, CA, USA, 2014.

STRAHLER, A. N. *Physical Geography. The Köppen climate classification system*. Pag. 185-188. Ed. J. Wiley, 1963 (2ª edição).

TABAJARA, L. L. C. A.; WESCHENFELDER, J. Recuperação de dunas frontais em área degradada por sangradouro na praia de Xangri-lá/RS. *Gravel, Porto Alegre*, v. 9, n. 1, p. 69-85, 2011.

TABAJARA, L. L. et al.; Vulnerabilidade e classificação das dunas da praia de capão da canoa, litoral norte do Rio Grande do Sul. *Gravel*, v. 3, p. 71-84, 2000.

TOMAZELLI, LUIZ. Morfologia, organização e evolução do campo eólico costeiro do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v. 21, n. 1, p. 64-71, 1994.

VILLWOCK, J. A.; *Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis*. *Pesquisas em Geociências*, v. 16, n. 16, p. 5-49, 1984.

VILLWOCK, Jorge A.; TOMAZELLI, Luiz José; TÉCNICAS, Notas. *Geologia costeira do Rio Grande do sul. Notas técnicas*, v. 8, p. 1-45, 1995.

