

A Contribuição das Dunas para o Serviço Ecológico de Proteção Costeira no Litoral Norte do RS

The Dunes Contribution to the Ecosystem Service of Coastal Protection on the Northern Coast of RS

Daniela Forgiarini da Silva¹

Tatiana Silva da Silva²

Luciana Slomp Esteves³

Giuliana Andréia Sfredo⁴

Palavras-chave:

Serviço Ecológico
Dunas
Proteção Costeira
Erosão

Resumo

As dunas desempenham um papel crucial nos ecossistemas da costa, fornecendo o serviço ecológico de proteção costeira. Este artigo investiga a relevância das dunas na oferta do serviço ecológico de proteção costeira no Litoral Norte do Rio Grande do Sul - RS. A análise empregou o modelo *Coastal Vulnerability* do *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs - InVEST* para quantificar a suscetibilidade à erosão e inundação. Os resultados refletem o valor relativo do nível de exposição a esses riscos costeiros considerando a presença de dunas. Posteriormente, o modelo foi usado novamente, desta vez excluindo a presença das dunas. Assim, foi possível identificar onde a presença das dunas contribui para reduzir a exposição costeira e, indiretamente atribuir no papel das dunas em prover o serviço de proteção costeira. A análise comparativa dos resultados entre as duas simulações mostrou maiores diferenças no setor sul da área de estudo. Os dois principais campos de dunas na área de estudo estão localizados em Cidreira e Torres. No município de Torres, a simulação sem a presença de dunas não apresentou diferenças expressivas de exposição costeira. Já em Cidreira, os valores de exposição costeira aumentaram, indicando que neste local a presença das dunas desempenham um papel relevante no serviço ecológico de proteção costeira. Com isto, as dunas são uma barreira natural contra eventos como de erosão e inundação na linha de costa, porém no processo de mapeamento do serviço ecológico de proteção costeira não é a única variável que é identificada. Isto ficou evidente na porção norte, em Torres, a topografia local, associada com a dinâmica dos ventos influencia na barreira natural contra estes eventos. A maior ameaça nesta região está ligada ao processo de expansão da zona urbana. Já na porção sul as dunas contribuem para promover o serviço ecológico de proteção.

Keywords

Ecosystem Services
Dunes
Coastal Protection
Erosion

Abstract

Coastal dunes have a crucial role in offering the ecosystem service of natural coastal protection. This paper investigates the importance of dunes in providing the ecosystem service of natural coastal protection on the North Coast of the State of Rio Grande do Sul (RS) in southern Brazil. The *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST®) Coastal Vulnerability Model* was used to quantify the relative susceptibility to coastal erosion and flooding within the study area. First, the model was run to assess the susceptibility to coastal hazards considering the presence of dunes. Then, the model was run again without the presence of dunes. By comparing the results of the two model simulations, it was possible to identify where dunes contribute to reducing coastal exposure, which indirectly reflects their role in providing the ecosystem service of natural coastal protection. There are two main dune fields in the study area, one in the northern coastal sector and one in the southern sector, respectively in the municipalities of Torres and Cidreira. The index of exposure values produced by the two model simulations were very similar for locations along the Torres coastline. In contrast, along the coast of Cidreira, results from the model simulation without dunes produced higher exposure values than the simulation with the presence of dunes, suggesting that the dunes have an important role in offering natural coastal protection. Dunes are a natural barrier against coastal erosion and flooding, but they are not the only factor influencing the ecosystem service of coastal protection. In Torres, for instance, the local topography and the wind patterns contribute to reducing local exposure. The greatest threat in this sector is the urban sprawl.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. daniforgi@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. tatiana.silva@ufrgs.br

³ Bournemouth University – BU, Bournemouth, Inglaterra. lesteves@bournemouth.ac.uk

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. giulianasfredo@gmail.com

INTRODUÇÃO

A erosão costeira é um problema mundial (Nguyen *et al.*, 2016), que vem sendo intensificado pelo aumento do nível do mar, mudanças climáticas e o aumento da densidade demográfica costeira (Luijendijk *et al.*, 2018; Prates *et al.*, 2012).

Os ambientes costeiros, incluindo dunas e praias, oferecem importantes serviços ecossistêmicos, como de proteção costeira, atuando como barreiras naturais contra tempestades, minimizando os danos causados por erosão e inundações. Além disso, esses ambientes também oferecem outros serviços ecossistêmicos, (Alexandrakis *et al.*, 2015; Gopalakrishnan *et al.*, 2011; Landry *et al.*, 2020).

Desta maneira, quando as dunas são removidas ou substituídas por processos antrópicos, em áreas de baixa elevação, os ambientes ficam mais suscetíveis a processo de inundações durante as tempestades, desencadeando danos à infraestrutura, perdas econômicas em empreendimentos à beira-mar, e potencialmente, afetando outros serviços ecossistêmicos (Alexandrakis *et al.*, 2015; Gopalakrishnan *et al.*, 2011; Landry *et al.*, 2020; Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008).

Práticas de substituição de dunas por processos antrópicos, como os de engenharia costeira, envolvem a construção de muros de contenção e espigões (Gopalakrishnan *et al.*, 2011; Landry; Hindsley, 2011), podem afetar a qualidade estética da costa e interferir na dinâmica costeira, além de acelerar a erosão nas praias adjacentes (Esteves; Santos, 2002; Huang *et al.*, 2007).

A ausência das dunas, que constitui uma variável no controle da exposição costeira, pode aumentar o risco físico de vulnerabilidade costeira em determinada localidade, (Nguyen *et al.*, 2016; Romieu *et al.*, 2010). Além disso, o índice vulnerabilidade costeira é, geralmente, maior em países com menor recurso financeiro, devido às populações mais vulneráveis estarem situadas em áreas de maior risco físico (Bonetti

et al., 2013; Cutter *et al.*, 2003; Kleinosky *et al.*, 2007; Masozera *et al.*, 2007).

Além disso, a constituição de um índice de vulnerabilidade costeira é complexa, constituída de três variáveis do sistema, conforme BID (2010): exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Há vários indicadores ou modelos na constituição da vulnerabilidade costeira (Nguyen *et al.*, 2016).

Nesse sentido, um dos modelos mais utilizados a nível global e que desempenha um papel importante na construção de índices de vulnerabilidade costeira (Ballesteros; Esteves, 2021; Ruheili; Boluwade, 2023; Zhang *et al.*, 2020) é o modelo *Coastal Vulnerability* do *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs - InVEST*, que permite obter a variável de exposição - risco físico, e dessa forma, avaliar o potencial de erosão e inundação ao longo da linha costeira (Invest, 2023).

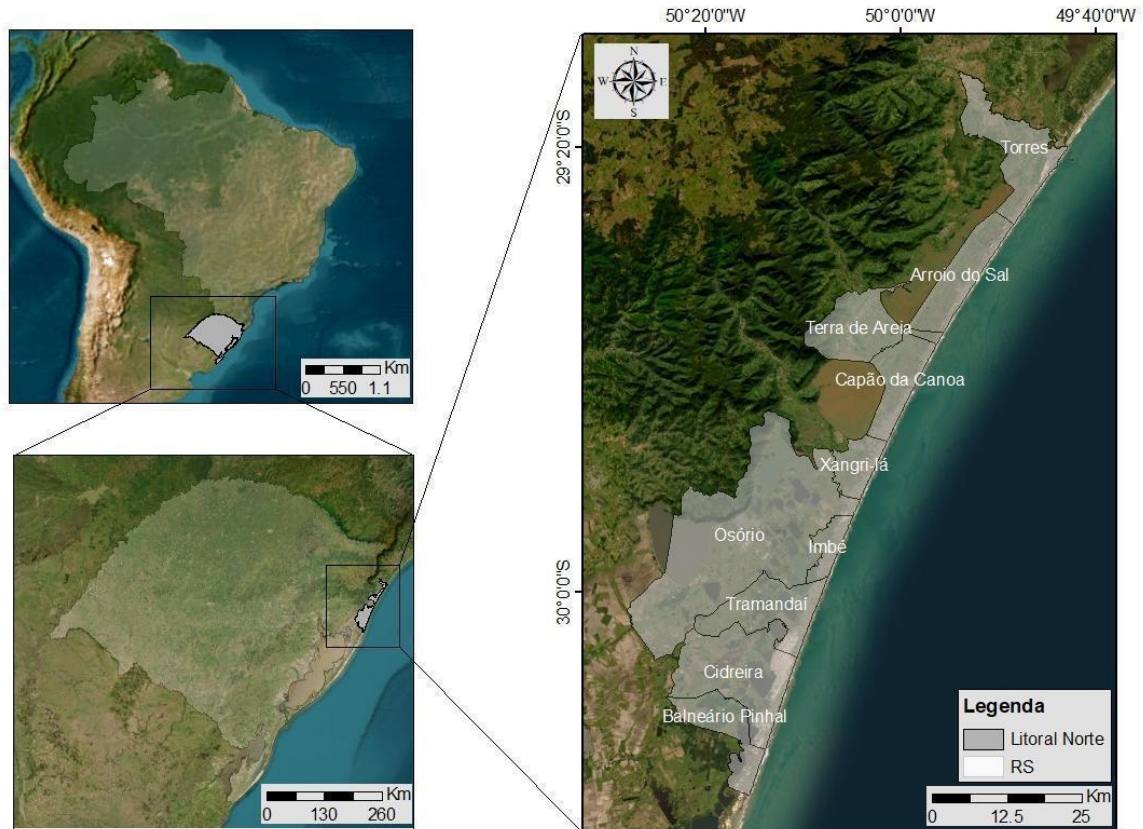
Este estudo de caso tem como área de estudo o Litoral Norte do Rio Grande do Sul (RS), e tem como objetivo analisar a importância das dunas na oferta do serviço ecossistêmico de proteção costeira no Litoral Norte do RS. Para tornar a análise possível, foi utilizado o modelo *Coastal Vulnerability* do *InVEST*, com a presença da variável dunas e com a sua ausência.

ÁREA DE ESTUDO

O Litoral Norte do RS é composto pelos municípios costeiros de Balneário Pinhal, Cidreira, Tramandaí, Imbé, Osório, Xangri-Lá, Capão da Canoa, Terra de Areia, Arroio do Sal e Torres. Está situado entre as coordenadas geográficas 29° 17' a 30° 18' de latitude Sul e 49° 44' a 50° 24' de longitude Oeste. Possui uma área de 3.700 km² e uma extensão de 120 km de costa (FEPAM, 2021b).

É delimitado, ao sul, pelo município de Balneário Pinhal, ao norte, pelo rio Mampituba, a leste pelo oceano e, a oeste em função de sua formação geológica, pelo relevo, bacia de drenagem e limites políticos (Figura 1) (FEPAM, 2000).

Figura 1 - Área de estudo no litoral norte do RS, sul do Brasil.



Fonte: Os autores (2023).

A formação geológica é recente, no litoral gaúcho, cerca de 5.000 a.C., com aproximadamente 618 km de costa retilínea (FEPAM, 2000; FEPAM, 2021a). O Litoral Norte RS está inserido no sistema deposicional Barreira-Laguna IV, formado durante o estágio final da transgressão marinha pós-glacial (Dillenburg *et al.*, 2000).

Quanto aos aspectos demográficos, a região do Litoral Norte do RS apresenta-se como predominantemente urbanizada, com uma população fixa aproximada de 198.235 habitantes. Durante o período de veraneio, essa população aumenta consideravelmente, atingindo cerca de 340.436 habitantes, devido ao fluxo de pessoas em busca do turismo de sol e mar (Germani *et al.*, 2020; Rio Grande do Sul, 2021).

Com um aumento estimado atual da população fixa de 25.38% (IBGE, 2022). Em 2021, observou-se um aumento significativo nas vendas de imóveis em alguns municípios, como Torres que apresentou acréscimo de 65%, Tramandaí com 34% e Imbé com 50% (Rodrigues, 2020), esse processo é observado na malha urbana dos municípios (IBGE, 2023). Tais processos de expansão urbana e crescimento populacional resultaram em uma

urbanização da linha de costa superior a 77%, sendo que 55% das construções estão localizadas em áreas de dunas (Esteves *et al.*, 2003; Esteves 2004).

Fatores como a urbanização, associada à infiltração e compactação do solo, concentração de sangradouros em torna da linha de costa e ocorrência crescente de tempestades e inundações vêm contribuindo para a erosão costeira no Litoral Norte do RS. Esses processos também afetam as dunas frontais e ocasionam o afloramento do lençol freático (Calliari *et al.*, 2010; Vianna *et al.*, 2015).

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição e aplicação do modelo espacial

O *Coastal Vulnerability Model – InVEST*, versão 3.12.1, produz um índice qualitativo de exposição costeira à erosão e à inundação, bem como um resumo da densidade populacional humana nas proximidades da linha de costa. Pode ser usado para identificar, de forma relativa, os setores da linha de costa, que são

mais ou menos suscetíveis à erosão e inundação (Invest, 2023).

O modelo mapeia de forma indireta o serviço ecossistêmico de proteção costeira, ou seja, quanto maior for o risco de erosão e inundação, menor será a oferta do serviço ecossistêmico de proteção costeira.

O modelo segue os métodos propostos por Gornitz (1990); Hammar-Klose e Thieler (2001). O índice de exposição incorpora sete variáveis biogeofísicas: relevo (no caso modelo digital de elevação), habitats naturais, exposição ao vento, exposição de ondas, potencial de maré meteorológica, geomorfologia (baseado na geomorfologia semelhante ao proposto por Hammar-Klose e Thieler, (2001) e mudança do nível do mar (as duas últimas variáveis são de uso opcional no modelo).

Os resultados do modelo são apresentados por meio de valores atribuídos a pontos ao longo da linha de costa, variando de 1 (muito baixo) a 5 (muito alto).

Estrutura de dados e fonte de informação

Os dados de entrada do modelo *Coastal Vulnerability* do *InVEST*, bem como as variáveis utilizadas para os dados de entrada e suas origens estão ilustrados abaixo (Tabela 1). A classificação das variáveis de entrada, ou seja, o ranqueamento com seus respectivos valores estão disponíveis abaixo (Tabela 2). O ranqueamento e classificação dos dados de entrada das variáveis foram baseados no guia do modelo *Coastal Vulnerability* do *InVEST* (Invest, 2023).

Tabela 1 - Organização dos dados de entrada do modelo *Coastal Vulnerability* do *InVEST*.

Dados de entrada	Variáveis	Origem dos dados de entrada
Área de interesse (Vetor) e a Área de amortecimento (Vetor)	Municípios do Litoral Norte (Balneário Pinhal, Imbé, Osório, Xangri-lá, Capão da Canoa, Terra de Areia, Arroio do Sal e Torres)	Dados do Instituto Brasileira de Geografia e Estatística - IBGE (2020)
Vento; ondas; Potencial de maré meteorológica (Vetor)	Dados padrão de vento e ondas compilados de 8 anos de <i>WAVEWATCH III</i>	Dados disponíveis pelo pacote de download do <i>InVEST</i> (2022)
Batimetria (Raster)	Dados batimétricos, 15 arcos de segundo (~450 metros)	Dados utilizados da Gridded Bathymetry - GEBCO (2022)
Relevo (Raster)	Modelo digital de elevação	Dados do United States Geological Survey – USGS (2020)
Contorno da Plataforma Continental (Vetor)	Plataforma Continental no valor de 180m	Mapeado pelos autores com base nos estudos de Calliari <i>et al.</i> (2009) e Castro <i>et al.</i> (2006)
Habitats e Geomorfologia (csv e Vetor)	Tabela de classificação (csv) de habitats e geomorfologia (classificação do rank na Tabela 3), com sua distância de proteção em metros, e com o Vetor correspondente (shapefile separados polígonos)	Dados do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do RS – ZEE
População (Raster)	Densidade populacional média (pessoas por quilômetro quadrado), resolução 30m	Dados do Censo 2010, disponível em <i>Geoserver</i> (2020)

Fonte: Os autores (2023).

Tabela 2 - Classificação das variáveis biogeofísicas do modelo proposto baseado na classificação *Coastal Vulnerability Model – InVEST*.

Rank	1 (muito baixo)	2 (baixo)	3 (moderado)	4 (alto)	5 (muito alto)
Geomorfologia	-----	Falésia média	Planície	Lagoas	Praia
Relevo	81 a 100 Percentil	61 a 80 Percentil	41 a 60 Percentil	21 a 40 Percentil	0 a 20 Percentil
Habitats	Sistemas de Matas (sistema de mata ciliar, sistema florestal, sistema de silvicultura)	Sistemas de áreas úmidas	Duna baixa	----	Sem habitat
Exposição de onda	81 a 100 Percentil	21 a 40 Percentil	41 a 60 Percentil	61 a 80 Percentil	81 a 100 Percentil
Potencial de maré meteorológica	0 a 20 Percentil	21 a 40 Percentil	41 a 60 Percentil	61 a 80 Percentil	81 a 100 Percentil

Fonte: Guia online do *Coastal Vulnerability Model* (Invest, 2023).

A variável de mudança do nível do mar não foi utilizada no modelo, devido os dados disponíveis não serem consistentes para esta área. A variável de exposição do vento é calculada tomando as velocidades de vento de 10% mais altas de um longo registro de velocidades de vento medidas, dividindo em 16 setores equiangulares, combinando as características de vento, e busca nesses setores (Invest, 2023).

As variáveis de entrada habitat e geomorfologia são as únicas que o modelador pode ranquear (Tabela 2), as demais variáveis são ranqueadas automaticamente pelo modelo.

A construção dos dados de entrada e o ranqueamento da variável habitat ocorreram da seguinte forma: os habitats sistema de matas e sistema de áreas úmidas foram disponibilizados pelo Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Rio Grande do Sul - ZEE-RS. O sistema de matas é composto pelas camadas de sistema de mata ciliar, sistema florestal e sistema de silvicultura, e foi atribuído o valor de 1.

Já o sistema de áreas úmidas com valor de 2. Os habitats de duna baixa, com valor de 3, e sem habitat, com valor de 5, as duas camadas respectivas foram descritas pelos próprios autores com base no ZEE-RS.

A variável geomorfologia foi classificada como falésia média, com o valor de 2, planícies -

3, lagoas - 4, praia - 5. Os dados utilizados foram obtidos do ZEE-RS, com exceção das falésias médias que foram descritas pelos próprios autores, com base no ZEE-RS.

As correções e adaptações para os dados de entradas foram feitas utilizando o *software ArcGIS - ArcMap*, versão 10.5.1. Para a análise estatística dos resultados utilizado nos gráficos, foi utilizado o *software RStudio*, versão 4.1.0.

Avaliação do risco de erosão e inundação em dunas

Para avaliar o risco de erosão e inundação na presença/ ausência de dunas foi utilizado o modelo *Coastal Vulnerability*, excetuando-se duas simulações distintas. Uma simulação considerou nos dados a presença das dunas, enquanto a outra simulação foi gerado sem considerar as dunas. Dessa forma, uma das simulações avaliou o risco relativo de exposição à erosão e à inundação considerando a presença das dunas, enquanto a outra simulação analisou o risco sem levar em conta a influência das dunas. Essa abordagem permitiu quantificar a importância das dunas na redução da suscetibilidade à erosão e inundação ao longo da linha de costa.

RESULTADOS

Através do modelo *Coastal Vulnerability* foram plotados 3736 pontos, com espaçamento de 30

metros entre eles, ao longo da linha de costa do Litoral Norte do RS. Os resultados dos valores de risco de exposição costeira à erosão e à inundação, considerando como variável de entrada a presença de dunas, estão ilustrados abaixo (Tabela 3, Figura 2, Figura 3 e Figura 4).

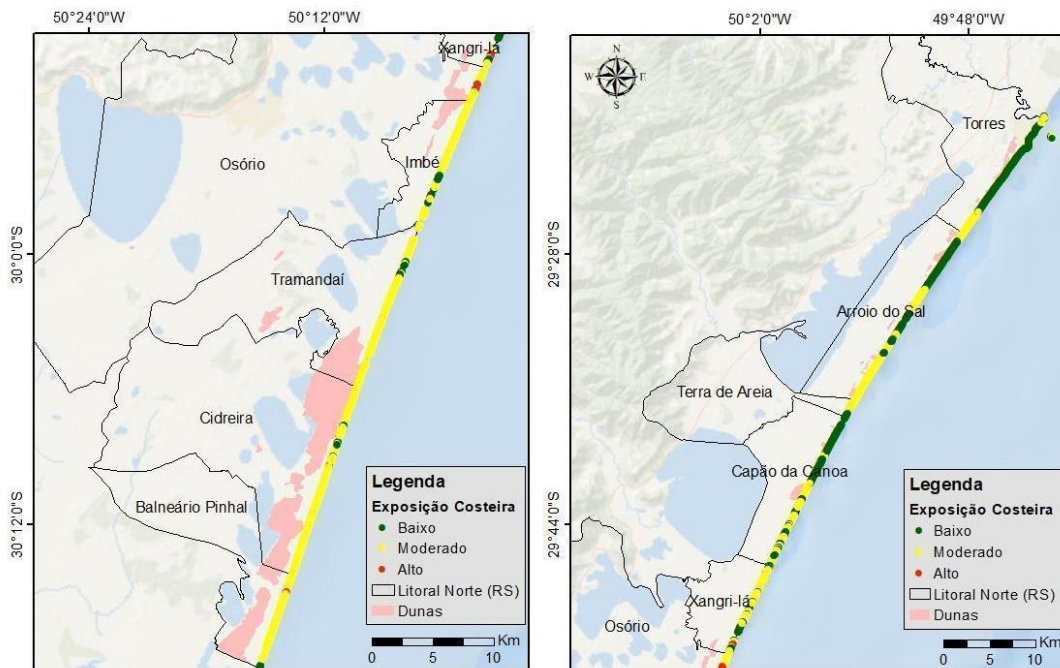
Tabela 3 - Porcentagem da linha de costa em cada município do Litoral Norte do RS classificado como nível baixo, moderado e alto de exposição relativa à erosão e à inundação, na presença de dunas.

Municípios	Baixo (%)	Moderado (%)	Alto (%)	Total
Balneário Pinhal	3.81	94.07	2.12	236
Cidreira	4.84	95.16	---	537
Tramandaí	8.62	91.38	---	406
Imbé	11.76	88.24	---	289
Osório	---	84.09	15.91	88
Xangri-lá	29.03	67.10	3.87	310
Capão da Canoa	53.46	46.54	---	578
Terra de Areia	21.05	78.95	---	76
Arroio do Sal	44.38	55.62	---	685
Torres	78.91	21.09	---	531
Total	33.24	65.93	0.83	3736

Fonte: Os autores (2023).

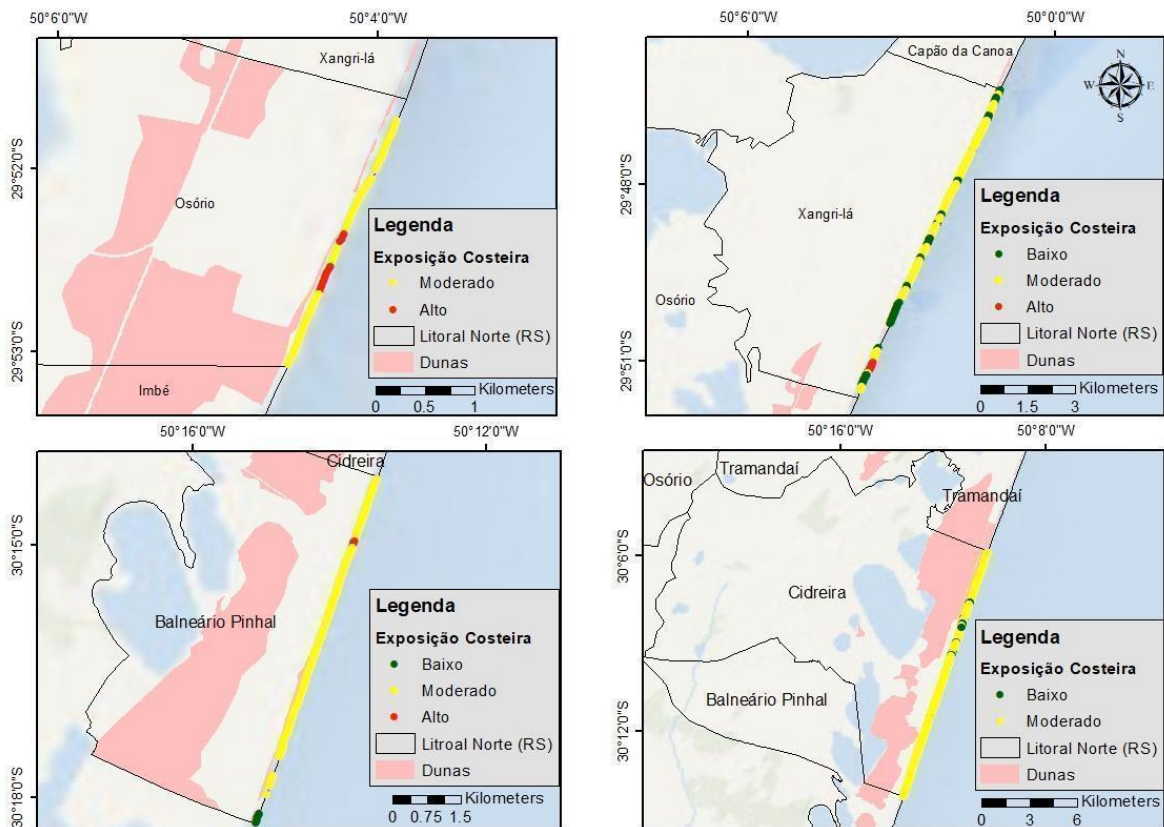
Figura 2 - Distribuição espacial do nível de Exposição Relativa à Erosão e à Inundação nos setores sul (esquerda) e norte (direita) do Litoral Norte do RS, na presença de dunas.

Exposição Costeira do Litoral Norte (RS) - Com Dunas



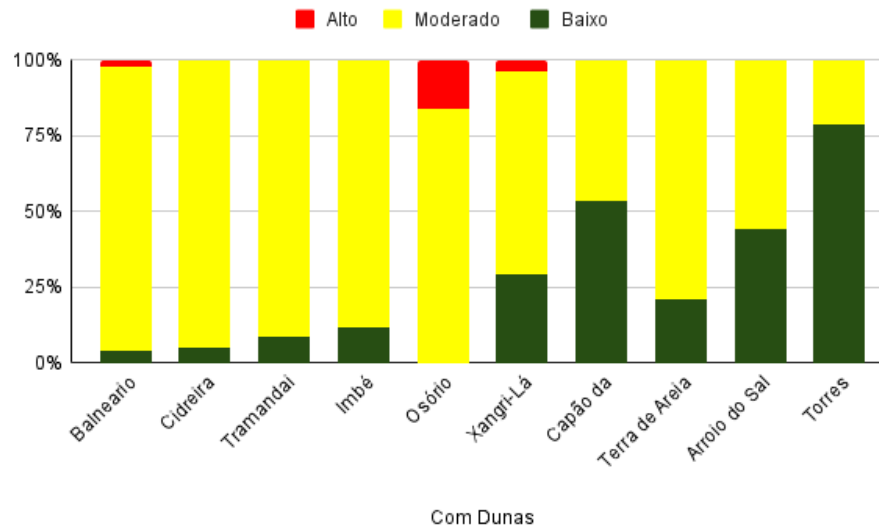
Fonte: Os autores (2023).

Figura 3 - Distribuição espacial do nível de Exposição Relativa à Erosão e à Inundação em quatro municípios do Litoral Norte do RS, com a presença de dunas.



Fonte: Os autores (2023).

Figura 4 - Resultados individuais dos municípios do Litoral Norte (RS) sobre o risco de exposição relativa à erosão e inundação (com dunas) (em %).



Fonte: Os autores (2023).

Já os resultados da simulação sem a presença das dunas (Tabela 4, Figura 5, Figura 6 e Figura 7), mostraram uma diferença de aumento de exposição costeira em relação a simulação com dunas. Na categoria de exposição costeira alta, observou-se um aumento de 198 pontos, representando uma porcentagem de 5,3%. Já na

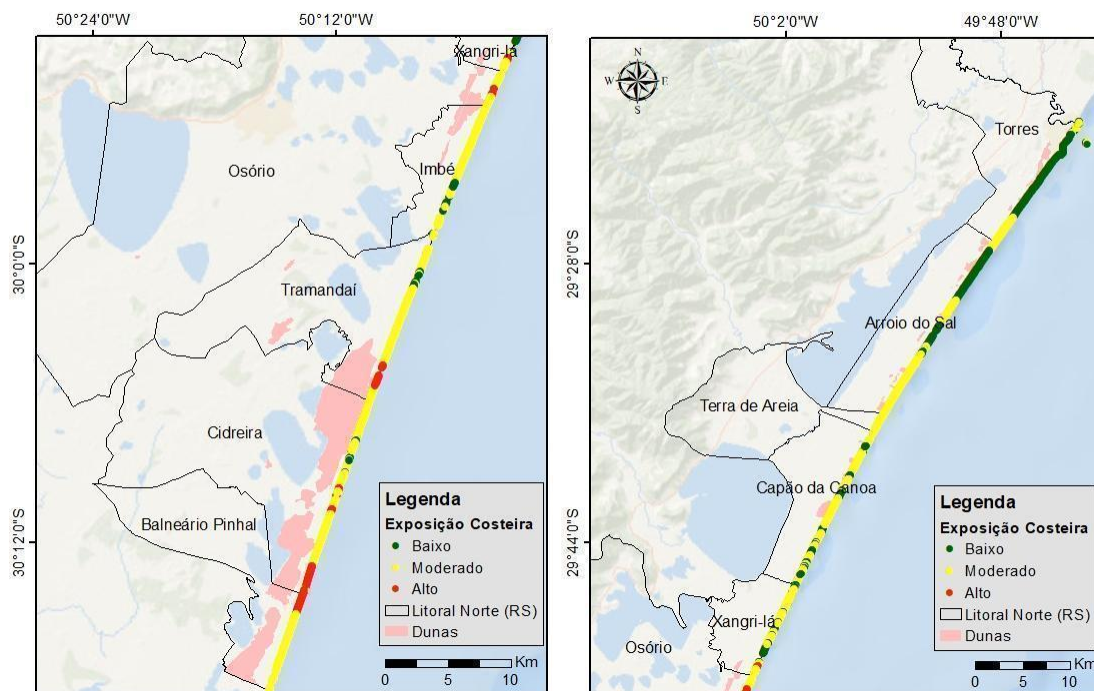
categoria de exposição costeira moderada, houve um aumento de 64 pontos, o que corresponde a 1,71%. Em contrapartida, houve uma redução de 262 pontos na categoria de exposição costeira baixa, resultando em uma diminuição de 7,01% nessa categoria.

Tabela 4 - Porcentagem da linha de costa em cada município do Litoral Norte do RS classificado como nível baixo, moderado e alto de exposição relativa à erosão e à inundação, sem a presença de dunas.

Municípios	Baixo (%)	Moderado (%)	Alto (%)	Total (Quantidade de pontos na linha de costa)
Balneário Pinhal	---	77.54	22.46	236
Cidreira	3.54	76.54	19.93	537
Tramandaí	8.37	81.03	10.59	406
Imbé	11.76	88.24	---	289
Osório	---	84.09	15.91	88
Xangri-lá	24.52	71.61	3.87	310
Capão da Canoa	21.11	78.89	---	578
Terra de Areia	---	100	---	76
Arroio do Sal	42.92	57.08	---	685
Torres	75.52	24.48	---	531
Total	26.23	67.64	6.13	3736

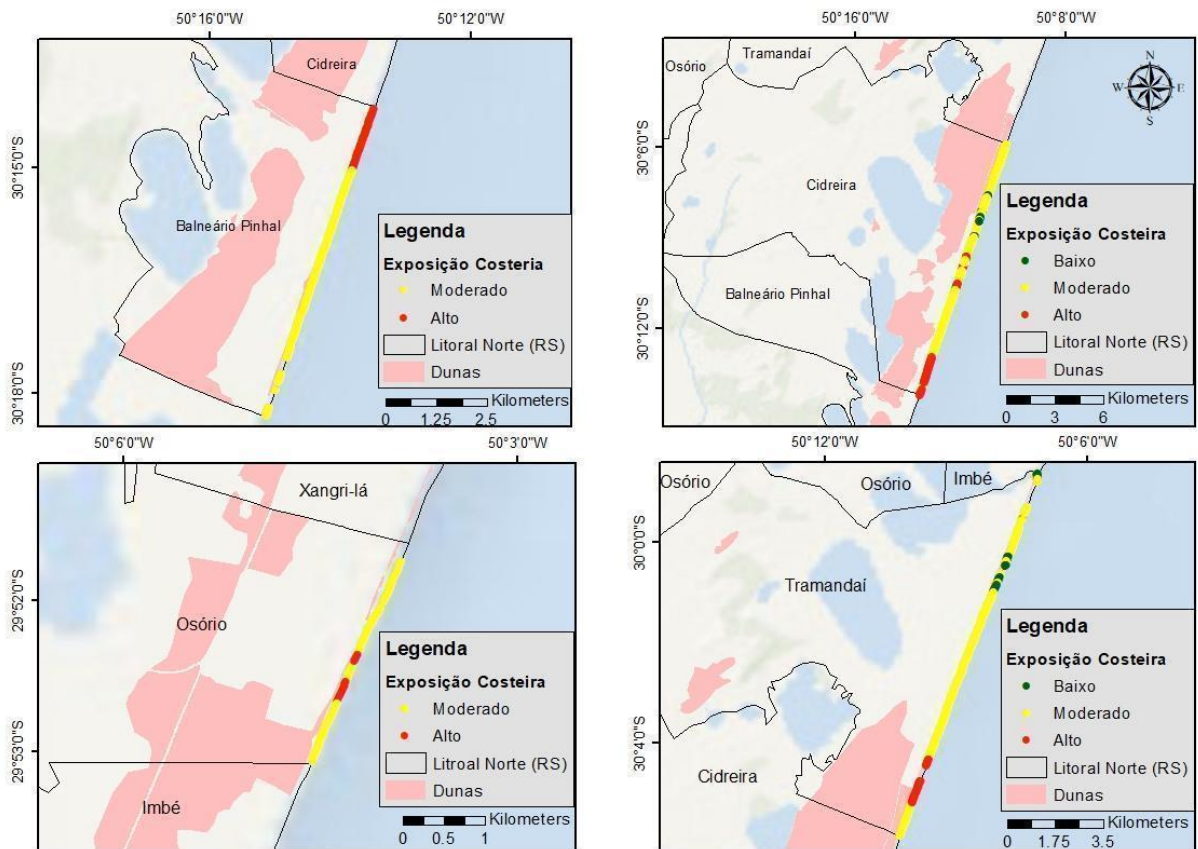
Fonte: Os autores (2023).

Figura 5 - Distribuição espacial do nível de Exposição Relativa à Erosão e à Inundação nos setores sul (esquerda) e norte (direita) do Litoral Norte do RS, sem a presença de dunas.
Exposição Costeira do Litoral Norte (RS) - Sem Dunas



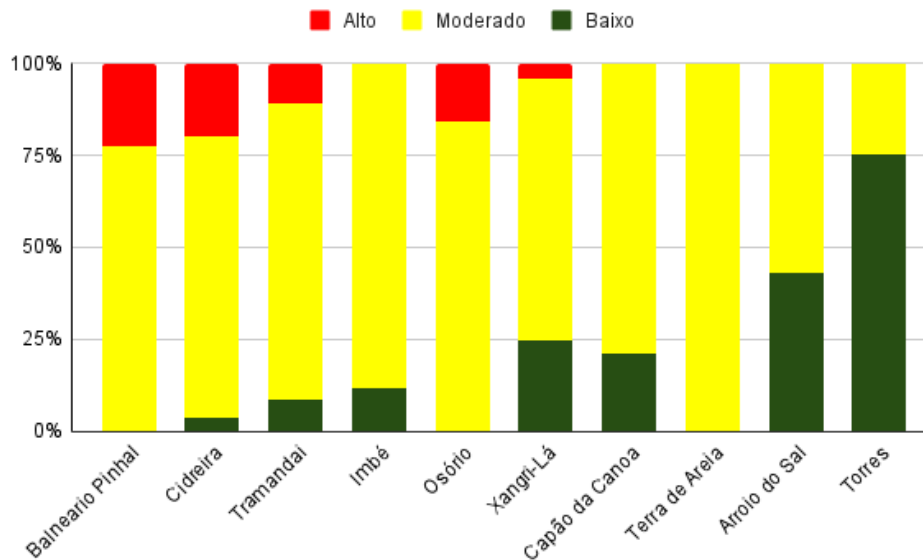
Fonte: Os autores (2023).

Figura 6 - Distribuição espacial do nível de Exposição Relativa à Erosão e à Inundação em quatro municípios do Litoral Norte do RS, sem a presença de dunas.



Fonte: Os autores (2023).

Figura 7 - Resultados individuais dos municípios do Litoral Norte (RS) sobre o risco de exposição relativa à erosão e inundação (sem dunas) (em %).



Fonte: Os autores (2023).

DISCUSSÃO

As simulações com e sem a presença de dunas mostraram que as dunas têm um papel importante na redução da exposição à erosão e inundação costeira, principalmente na porção sul, entre Imbé e Balneário Pinhal, no Litoral Norte do RS.

O mapeamento das dunas evidenciou a existência de descontinuidades na distribuição das dunas ao longo da linha costeira da área de estudo. Nos municípios de Terra de Areia e Arroio do Sal está melhor conservada a continuidade das dunas na linha de costa. Anteriormente, essas áreas eram caracterizadas por extensas faixas contínuas de dunas (Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008). Essa modificação pode ser resultado do processo de urbanização em andamento na região, como apontado nos dados de malha urbana do IBGE/2022 (IBGE, 2023), bem como, da possível interrupção ou redução da fonte de sedimentos que contribuía para a formação e manutenção desses ambientes ao longo da costa (Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008), e também o aumento da sangradouros nestas regiões, ocasionando ocasionam o afloramento do lençol freático (Calliari *et al.*, 2010; Vianna *et al.*, 2015).

Os resultados do modelo sem a presença das dunas em Osório estão associados, principalmente, aos fatores de expansão urbana, conforme os dados observados da malha urbana, de 2022 (IBGE, 2023), e o aumento da especulação imobiliária desde 2021, no Litoral Norte do RS (Rodrigues, 2020). Além disso, esse município é um dos mais populosos do Litoral Norte do RS (Rio Grande do Sul, 2021).

No que tange a Xangri-lá, houve aumento dos valores moderados de exposição costeira, na simulação sem as dunas, o município possui uma região urbanizada com condomínios luxuosos (IBGE 2023; Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008), sendo um indicador de influência sobre a região. É importante destacar, atualmente, que esses dois municípios não apresentam campos de dunas bem desenvolvidos na linha de costa, mas, anteriormente, sua costa era constituída por extensas faixas contínuas de dunas (Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008). Atualmente, Balneário Pinhal, Cidreira, Tramandaí e Torres são constituídas por esta dinâmica.

Em registros históricos, principalmente por fotografias aéreas, mostram os campos de dunas transgressivo estendiam-se de forma contínua

na linha de costa do Litoral Norte do RS, sendo uma planície costeira extensa (Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008).

Os dois municípios no Litoral Norte do RS que têm campos de dunas são Cidreira e Torres, com características diferentes. O primeiro com campos de dunas transgressivas, e o outro com reversos. Como qual, apresentando resultados diferentes em relação à simulação sem dunas.

Os campos dunas transgressivas tem características de praia adjacente com uma faixa arenosa, e alongada com ventos no sentido dominante NE-SW, altamente dependente da preservação dos corredores de alimento, caso haja avanço na urbanização local, ocasiona cancelamento destes corredores (Tomazelli *et al.*, 2008). Isto, já ocorre na porção sul do município de Cidreira (Esteves, 2004), e conforme os resultados da simulação sem dunas aumenta a exposição costeira nesta região, valores de moderado para alto.

Já os campos de dunas reversos apresentam baixa taxa de migração, com ventos predominantes de NE, e de S-SW. Além, da sua topografia local influenciar na diminuição dos ventos, devido a proximidade com a escarpa da Serra, o que influência desde o município de Torres até a porção norte do Imbé.

Com isto, a maior ameaça nesta região é o processo de expansão da zona urbana (Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008), associando com um aumento nos dados da malha urbana (IBGE, 2023), e a especulação imobiliária crescente (Rodrigues, 2020) a barreira natural de proteção costeira, no caso as dunas, neste município, não houve aumento de valores altos de exposição costeira, conforme observado nos resultados da simulação sem dunas no município, houve um aumento de quase 4% nos valores moderados de exposição costeira em Torres.

Observa-se que os valores de exposição alta na simulação sem a presença de dunas estão concentrados mais na porção sul do Litoral Norte do RS, de Imbé a Balneário Pinhal. Essa região sofre maior influência dos ventos, e sem a dinâmica de proteção das escarpas da Serra (Martinho *et al.*, 2010; Tomazelli *et al.*, 2008).

Apesar disso, os municípios de Capão da Canoa e Terra de Areia tem seus valores de exposição costeira aumentados nos resultados da simulação sem a presença de dunas. Com dados observados de malha urbana (IBGE, 2023), e a especulação imobiliária que ocorre neste município, em Capão da Canoa (Rodrigues, 2020). Já em Terra de Areia estes

processos não ocorrem (IBGE, 2023; Rodrigues, 2020).

No município de Arroio do Sal há um aumento de 2% nos valores moderados de exposição costeira. Em trabalhos anteriores, estes três municípios apresentaram acréscimo em sua linha de costa: 29.1% - Arroio do Sal, 56.6% - Terra de Areia e 86.5% - Capão da Canoa (Esteves, 2004).

Como pode-se notar nos resultados da simulação sem dunas, o Litoral Norte do RS tem duas dinâmicas diferentes. Uma na porção norte, entre Torres a norte de Imbé, cuja topografia local, proximidade com a escarpa da Serra, influência na dinâmica da diminuição dos ventos, fazem com que os resultados da simulação não tenham valores altos de exposição costeira. E outra, na porção sul, de Imbé a Balneário Pinhal, no qual não há influência da topografia local, devido não haver proximidade com a escarpa da Serra, o que provoca o aumento da velocidade dos ventos, consequentemente os resultados da simulação foram aumentados os valores altos de exposição costeira.

Esta porção sul do Litoral Norte do RS, de Imbé a Balneário Pinhal, sofre influência direta sobre a barreira de proteção natural, no caso dunas, como é demonstrado na comparação dos resultados entre as duas simulações com e sem dunas. Seus valores altos de exposição costeira aumentaram 13,49%, enquanto na porção norte aumentou a exposição costeira em valores moderados de 10,80%.

Fatores como o aumento da malha urbana (IBGE, 2023), e a especulação imobiliária (Rodrigues, 2020) em áreas costeiras ocasionam sérios impactos nos serviços ecossistêmicos, como o de proteção costeira, prejudicando as barreiras naturais de proteção costeira, como dunas (Ruheili; Boluwade, 2023).

Estudos utilizados de simulações com e sem barreiras naturais, no modelo *Coastal Vulnerability* do *InVEST*, demonstraram um aumento de exposição costeira na linha de costa (Ballesteros; Esteves, 2021; Ruheili; Boluwade, 2023). Esta simulação contribui para verificar as futuras ameaças globais sobre os serviços ecossistêmicos costeiros, e auxiliar na busca de ações que prevêm, ou mitiguem estas ameaças (Ruheili; Boluwade, 2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve por objetivo a importância das dunas para a composição do serviço ecossistêmico de proteção costeira no Litoral Norte do RS. A presença de dunas funciona como uma barreira natural, protegendo contra a erosão, a inundação e a elevada exposição a perigos costeiros. Pode-se notar que na simulação sem a presença de campos dunares a exposição costeira teve seus valores aumentados.

Porém, não é a única variável que contribui no mapeamento do serviço ecossistêmico de proteção costeira. Isto ficou evidente na porção norte do Litoral Norte do RS, principalmente no município de Torres, onde a topografia local, associada com a dinâmica dos ventos influência na barreira natural contra eventos que causem erosão, a inundação. Sendo, nesta região, a maior ameaça está relacionada ao processo de expansão da zona urbana. Fatores como aumento da malha urbana, e especulação imobiliária estão contribuindo consideravelmente neste processo.

Já na porção sul do Litoral Norte do RS as dunas contribuem para promover o serviço ecossistêmico de proteção, no qual ficou evidente nos campos de dunas do município de Cidreira.

Sugere-se para trabalhos futuros na identificação da constituição do serviço ecossistêmico de proteção costeira, sejam incluídas outras variáveis, além das dunas no processo de mapeamento do serviço ecossistêmico de proteção costeira.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRAKIS, G.; MANASAKIS, C.; KAMPANIS, N.A. Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. *Ocean & Coastal Management*, v. 11, p. 1-11, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.04.001>
- BALLESTEROS, C.; ESTEVES, L. S. Integrated Assessment of Coastal Exposure and Social Vulnerability to Coastal Hazards in East Africa. *Estuaries and Coasts*, v. 44, p. 2056–2072, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-00930-5>
- BID - Inter-American Development Bank. 2010. 2010. Disponível em: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Vulnerabilidad-y-adaptación-al-cambio-climático-Diagnóstico-inicial-avances>

- vacíos-y-potenciales-líneas-de-acción-en-Mesoamérica-(Anexos). Acesso em: 11 jan. 2023.
- BONETTI, J.; KLEIN, A.H.F.; LUCA, C.B.; MULDER, M. Spatial and Numerical Methodologies on Coastal Erosion and Flooding Risk Assessment. In Finkl, C. (Editor), *Coastal Hazards*, Cap. 16, Coastal Research Library Series, Springer, Dordrecht, p.423-442, 2013. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5234-4_16
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Gestão Territorial. Gerenciamento Costeiro no Brasil, 2019. Disponível em: www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro. Acesso em: 09 jun. 2020.
- CALLIARI, L. J.; GUEDES, R.M.C.; PEREIRA, P.S.; LÉLIS, R.F.; ANTIQUEIRA, J.A.; FIGUEIREDO, S.A. Perigos e riscos associados a processos costeiros no Litoral Sul do Brasil (RS): Uma síntese. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 51-63, 2010. <https://doi.org/10.14210/bjast.v14n1.p51-63>
- CASAGRANDE, A. I.; AGUIAR, D.F.; NICOLODI, J.L.; DAMIÃO, A.A. Tendências de variação na linha de costa de Cidreira (RS) e suas relações com parâmetros oceanográficos e meteorológicos. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 31, p. 35-62, 2018.
- CASTRO, B.M.; BRANDINI, F.P., PIRES-VANIN, A.M.S.; MIRANDA, L.B. Multidisciplinary Oceanographic Processes on the Western Atlantic Continental Shelf between 4°N and 34°S (4,W). In: Robinson, A.R; Brink, K.H (Editor), *THE SEA - Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*, Cap. 8, p. 259-294, Cambridge, MA.
- CICES V5.1. European Environment Agency. 2018. Disponível em: <https://cices.eu/resources/>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- CUTTER, S. L.; BORUFF, B.J.; SHIRLEY, W.L. Social Vulnerability to Environmental Hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n.º2, p. 242-261, 2003. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- DILLENBURG, S. R.; ROY, P.S, COWELL, P.J; TOMAZELLI, L. J. Influence of Antecedent Topography on Coastal Evolution as Tested by the Shoreface Translations-Barrier Model (STM). **Journal of Coastal Research**, v. 16, n. 1, p. 71-81, 2000.
- ESTEVEES, L. S. Shoreline Changes and Coastal Evolution as Parameters to Identify Priority Areas for Management in Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 31, n. 2, p. 15-30, 2004.
- ESTEVEES, L. S.; SILVA, A.R.P.; AREJANO, T.B.; PIVEL, M.A.G.; VRANJAC, M.P. Coastal Development and Human Impacts Along the Rio Grande do Sul Beaches, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 35, p. 548-556, 2003.
- ESTEVEES, L. S.; DILLENBURG, S.; TOLDO, E. Alongshore patterns of shoreline movements in southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, SI 39, p. 215-219, 2006.
- ESTEVEES, L. S.; SANTOS, I. R. Impacto Econômico da erosão na praia do Hermenegildo (RS), Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 28, n. 2, p. 393-403, 2002. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.20313>
- FEPAM. Diretrizes Ambientais para o desenvolvimento dos Municípios do Litoral Norte. Fundação Estadual de Proteção Ambiental | FEPAM, Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental - n.1, 2000.
- FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS. Programas e Projetos. 2021a. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/programas/gerco.asp>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS. QUALIDADE AMBIENTAL 2021b. Disponível em: www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bal_res_litoralnorte.asp. Acesso em 23 mar. 2021.
- GEBCO. General Bathymetric Chart of the Oceans. Gridded bathymetric data. 2022. Disponível em: https://www.gebco.net/data_and_products/historical_data_sets/. Acesso em: 19 nov. 2022.
- GeoServer. 2020. Available: <https://geoserver.org/>. Accessed on: set. 15, 2020.
- GERMANI, Y. F.; FIGUEIREDO, S.A.; CALLIARI, L.J; VIANNA, H.D. O papel da antepraia na resposta costeira durante a elevação do nível do mar na Barreira Regressiva de Torres a Imbé, RS. **Pesquisas em Geociências**, v. 47, n. 3, p. 1-22, 2020. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.109986>
- GOPALAKRISHNAN, S.; SMITH, M.D.; SLOTT, J.M.; MURRAY, A.B. The value of disappearing beaches: A hedonic pricing model with endogenous beach width. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 61, p. 297-310, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2010.09.003>
- GORNITZ, V. Vulnerability of the east coast, U.S.A. to future sea level rise. **Journal of Coastal Research**, n. 9, p. 201-237, 1990.
- HAMMAR-KLOSE, E. S.; THIELER, E. R. Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: A Preliminary Database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico Coasts. U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-68, 1 CD-ROM, 2001. <https://doi.org/10.3133/ds68>
- HUANG, J.-C.; POOR, P.J.; ZHAO, M.Q. Economic Valuation of Beach Erosion Control.

- Marine Resource Economics**, v. 22, n. 3, p. 221-238, 2007. <https://doi.org/10.1086/mre.22.3.42629556>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 19 nov. 2022.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasília, DF. 2020. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/10861-mapas-regionais.html?=&t=sobre>. Acesso em 20 ago. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasília, DF. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html?=&t=downloads>. Acesso em 10 set. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasília, DF. 2023. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html#:~:text=No%20ano%20de%202022%2C%20a,Fernando%20de%20Noronha%20%E2%80%93%20PE\)%%3B](https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html#:~:text=No%20ano%20de%202022%2C%20a,Fernando%20de%20Noronha%20%E2%80%93%20PE)%%3B). Acesso em 10 set. 2020.
- INVEST - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs. 2023. Disponível em: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/#tools-to-facilitate-ecosystem-service-analyses>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- JORNAL CIDADES, Ressaca causa a erosão e compromete parte da Interpraias, entre Imbé e Osório. 2021. Disponível em: https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/jornal_cidades/2021/07/804310-ressaca-causa-a-erosao-e-compromete-parte-da-interpraias-entre-imbe-e-osorio.html. Acesso em: 30 jan. 2023.
- JORNAL CIDADES. Ressaca causa erosão em trecho da Interpraias entre Imbé e Osório. 2020. Disponível em: https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/jornal_cidades/2020/07/748214-ressaca-causa-erosao-em-trecho-da-interpraias-entre-imbe-e-osorio.html. Acesso em: 30 jan. 2023.
- KLEINOSKY, L. R.; FISHER, A.; YARNAL, B. Vulnerability of Hampton Roads, Virginia to Storm-Surge Flooding and Sea-Level Rise. **Natural Hazards**, v. 40, p. 43–70, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0004-z>
- LANDRY, C. E.; HINDSLEY, P. Valuing Beach Quality with Hedonic Property Models. **Land Economics**, v. 87, n. 1, p. 92–108, 2011. <https://doi.org/10.3368/le.87.1.92>
- LANDRY, C. E.; SHONKWILER, J.S.; WHITEHEAD, J.C. 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. <https://doi.org/10.3368/le.87.1.92>
- LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The State of the World's Beaches. **Scientific Reports**, v. 8, n. 6641, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- MARTINHO, C. T.; HESP, P.A.; DILLENBURG, S.R. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. **Geomorphology**, v. 117, n. 1-2, p. 14-32, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.002>
- MASOZERA, M.; BAILEY, M.; KERCHNER, C. Distribution of impacts of natural disasters across income groups: A case study of New Orleans. **Ecological Economics**, v. 63, p. 299-306, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.06.013>
- MEA. 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Island Press, United States of America. 155p. Disponível em: pdf.wri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf. Acesso em: 08 jun. 2020.
- NGUYEN, T. T. X.; BONETTI, J.; ROGERS, K.; WOODROFFE, C.D. 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. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022>
- PRATES, A. P. L.; GONÇALVES, M.A; ROSA, M.R. Panorama da conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos no Brasil. Brasília: MMA, p. 152, 2012.
- RAMSAR. Cuidar das Zonas Úmidas: Uma resposta às mudanças climáticas. 2010. Disponível em: www.mma.gov.br/estruturas/205/_publicacao/205_publicacao29112010033202.pdf. Acesso em: 13 jun. 2020.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental. Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Ed.6º, Porto Alegre - RS, 2021.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. 1ª Etapa do Plano da Bacia do Rio Tramandaí, Relatório Temático A.1 - Diagnóstico da Dinâmica Social da Bacia, p. 76, 2004. Disponível em: comitetramandai.blogspot.com/p/documentacao.html. Acesso em: 10 jun. 2020.
- RODRIGUES, L. Arrecadação mostra aumento na venda de imóveis no Litoral Norte durante a pandemia. GZH Economia, Rio Grande do Sul, 29 set. 2020. Disponível em:

- <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/noticia/2020/10/arrecadacao-mostra-aumento-na-venda-de-imoveis-no-litoral-norte-durante-a-pandemia-ckgvebx9x0028012tkjl0splr.html>. Acesso em: 8 nov. 2021.
- ROMIEU, E.; WELLE, T.; SCHNEIDERBAUER, S.; PELLING, M.; VINCHON, C. Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: Revealing gaps and synergies through coastal applications. *Sustainability Science*, v.5, n.2, p.159-170, 2010.
- RUHEILI; A. A.I.; BOLUWADE, A. Towards Quantifying the Coastal Vulnerability due to Natural Hazards using the InVEST Coastal Vulnerability Model. *Water*, v. 15, n. 380, p. 1-13, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15030380>
- TABAJARA, L. L. C. A.; OLIVEIRA, J.F.; LEITE, P.T.; OLIVEIRA, R.M.; FRANCHINI, R.A.L.; CRISTIANO, S.C.; CLAUSSEN, M.R.S. Critérios para a Classificação e Manejo de Costa Arenosa Dominada por Ondas e com Intensa Ocupação Urbana: o caso de Imbé, RS, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v.13, n.4, p.409-431, 2013. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, v. 13, n. 4, p. 409-431, 2013. <https://doi.org/10.5894/rgci381>
- TOLDO, JR. E. E.; ALMEIDA, L.E.S.B.; NICOLODI, J.L.; MARTINS, L.R. Erosão e Acresção da Zona Costeira. In: D. Muehe (org.), *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*, p.468-475, MMA/PGGM, Brasília, DF, Brasil, 2006.
- TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C. Geomorfologia e Potencial de Preservação dos Campos de Dunas Transgressivos de Cidreira e Itapeva, litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 35, n. 2, p. 47-55, 2008. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.17936>
- TOMAZELLI, L. J. O Regime de Ventos e a Taxa de Migração das Dunas Eólicas Costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 18-26, 1993. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21278>
- UNOC - United Nations Ocean Conference. 2017. Ocean Factsheet Package: People and Oceans. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/05/Ocean-fact-sheet-package.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- USGS - US Geological Survey. 2020. Disponível em: <https://www.earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em: 10 set. 2020.
- VIANNA, H. D.; CALLIARI, 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*, v. 42, n. 2, p. 141-158, 2015. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78116>
- VIANNA, H. D.; CALLIARI, L.J.; VIANNA, S.D. Inundação e erosão na costa Norte do Rio Grande do Sul - Brasil. Estudo de Caso: A maré meteorológica de outubro de 2016. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 4, p. 719-739, 2020. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1749>
- ZEEC LN - Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. 2022. Disponível em: http://ww2.fepam.rs.gov.br/doclics/ConsultasPublicas/53_57.pdf. Acesso em: 02 abr. 2023.
- ZHANG, Y.; RUCKELSHAUS, M.; ARKEMA, K.K; HAN, B.; LU, F.; ZHENG, H.; OUYANG, Z. Synthetic vulnerability assessment to inform climate-change adaptation along an urbanized coast of Shenzhen, China. *Journal of Environmental Management*, v. 255, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109915>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Daniela Forgiarini da Silva concebeu o estudo, coletou, analisou os dados e redigiu o texto. Tatiana Silva da Silva e Luciana Slomp Esteves conceberam o estudo e corrigiram o texto. Giuliana Andréia Sfredo corrigiu o texto.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.