

Revista de Gestão Costeira Integrada

*Journal of Integrated Coastal
Zone Management*

Volume 23(2): December 2023

ISSN 1646-8872



Revista de Gestão Costeira Integrada

Journal of Integrated Coastal
Zone Management



Volume 23, Issue 2 December 2023

Editorial Board

Francisco Taveira Pinto
Editor-in-Chief
<fpinto@fe.up.pt>

Paulo Rosa-Santos
Associate Editor
<pjrsantos@fe.up.pt>

Tiago Ferradosa
Associate Editor
<tferradosa@fe.up.pt>

Marcus Pollete
Section Editor
<mpollete13@gmail.com>

Marinez Scherer
Section Editor
<marinezscherer@gmail.com>

André Fortunato
Section Editor
<afortunato@lnec.pt>

Carlos Coelho
Section Editor
<ccoelho@ua.pt>

José Pinho
Section Editor
<jpinho@civil.uminho.pt>

A. Rita Carrasco
Section Editor
<azarcos@ualg.pt>

Ana Margarida Bento
Section Editor
<anabento@fe.up.pt>

Victor Ramos
Section Editor
<jvrc@fe.up.pt>

Guillermo Jorge Villalobos Zapata
Section Editor
<gvillal@uacam.mx>

RGCI/JICZM (ISSN: 1646-8972) is published quarterly
by an editorial pool composed by APRH, FEUP, CIMA, UNIVALI, UFRN and UPORTO
Correspondence: aprh@aprh.pt

Publishers

Editorial consortium comprising:

- APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.
e-mail: aprh@aprh.pt. web page: <http://www.aprh.pt>
- CIMA - Centro de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Edifício 7, Campus Universitario de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal.
e-mail: cima@ualg.pt. web page: <http://www.cima.ualg.pt>
- UNIVALI - Universidade do Vale do Itajai, Rua Uruguai, 458 - Centro, Itajai, SC, 88302-901 , Brazil
web page: <http://www.univali.br>
- UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caixa Postal 1524, Natal, RN, 59078-970 Brazil
web page: <https://www.sistemas.ufm.br>
- FEUP/UPORTO - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto Portugal. web page: https://sigarra.up.pt/feup/pt/web_page.inicial

Secretariat

Ana Estêvão (APRH), André Cardoso (APRH)

Copy editing

Francisco Taveira Pinto, Paulo Rosa Santos, Tiago Ferradosa

Formatting and pagination

André Cardoso (APRH)

Web page

André Cardoso (APRH)

SciELO DTD markup

APRH

Cover design

Francisco Taveira Pinto, Paulo Rosa Santos

ISSN: 1646-8872

Revista de Gestão Costeira Integrada

Journal of Integrated Coastal
Zone Management

23(2) – December 2023

Table of Contents

Editorial Note

F. Taveira-Pinto, P. Rosa-Santos, A.M. Bento, A.R. Carrasco, T. Fazeres-Ferradosa
Regiões Costeiras: Infraestruturas portuárias e dinâmicas sedimentares..... 87-89

Articles

Rafael Carvalho Neves, Valéria da Silva Quaresma, Alex Cardoso Bastos
Influência da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar da baía do Espírito Santo na variabilidade do padrão de assoreamento no porto de Tubarão, Brasil..... 91-115

Rafael Carvalho Neves, Valéria da Silva Quaresma, Alex Cardoso Bastos
Proveniência dos sedimentos finos para o porto de Tubarão, Brasil..... 117-134

Cynara da Nobrega Cunha, Anna Carolina Abreu
Mixing Process Evaluation Due to Sea Level Rise in Babitonga bay, Brazil..... 135-151

Rafaela Tiengo, Alicia Palácios-Orueta, Jéssica Uchôa and Artur Gila
Remote sensing approaches for land use/land cover change in coastal areas and oceanic islands: an open science-based systematic review..... 153-175

Emanoel Silva de Amorim, Gaby Carvalho Alves, Rayane Gabriella Pereira da Silva, Gislândia de Moraes Sampaio, Pedro Henrique Dantas, João Victor de Arruda Teles, Kalinny Patrícia Vaz Lafayette, Jonas da Silva Bezerra
Análise da viabilidade técnica-econômica das estruturas de contenção à erosão costeira..... 177-189

Editorial note / *Nota editorial*

REGIÕES COSTEIRAS: INFRAESTRUTURAS PORTUÁRIAS E DINÂMICAS SEDIMENTARES

F. Taveira-Pinto^{1,2}, P. Rosa-Santos^{1,2}, A. M. Bento^{1,2}, A. R. Carrasco³, T. Fazerer-Ferradosa^{1,2}

A dinâmica sedimentar costeira têm uma importância crucial na configuração e evolução das zonas litorais, impactando também diretamente com as infraestruturas e bacias portuárias em todo o mundo. O transporte de sedimentos ao longo da costa e a sedimentação nos portos têm implicações significativas na navegabilidade e segurança das operações portuárias. Uma compreensão precisa desses processos é essencial para o planeamento e gestão adequados das infraestruturas portuárias, incluindo a manutenção de canais de navegação, entre outros aspetos essenciais. Além disso, as infraestruturas portuárias desempenham um papel vital nas atividades de comércio global, assegurando a conexão entre regiões e impulsionando o desenvolvimento económico. Assim, a interação entre a dinâmica sedimentar costeira e as infraestruturas portuárias é um elemento essencial para garantir a eficiência operacional e a sustentabilidade ambiental dessas instalações à escala global.

Reconhecendo a importância estratégica das vias navegáveis e dos portos para a projeção internacional do Brasil, Neves *et al.* (2023a) destacam a relevância da compreensão da dinâmica sedimentar para o Porto de Tubarão, sublinhando a necessidade de dragagens periódicas para garantir a navegabilidade. A análise integrada de dados históricos e parâmetros hidrodinâmicos e sedimentares das Baías de Vitória e do Espírito Santo permite evidenciar vários desafios e destaca a Baía de Vitória como principal fonte de material sedimentar.

Para o mesmo caso de estudo, Porto de Tubarão, Neves *et al.* (2023b) destacam a importância das dragagens periódicas para facilitar a navegabilidade no interior dos portos, identificando as melhorias necessárias à compreensão da dinâmica sedimentar na região. A recolha e análise de 91 amostras sedimentares reforçam a importância do conhecimento da qualidade do material dragado. A possibilidade de ocorrerem impactos adversos durante e após os projetos de dragagem enfatiza a importância de se conhecer a qualidade do material dragado e da dinâmica sedimentar na área portuária, garantindo planeamento e gestão eficazes, e assegurando a mitigação efetiva dos impactos negativos no meio ambiente.

Tiengo *et al.* (2023) utilizam imagens de satélite e dados multiespectrais para detetar alterações no uso e cobertura do solo em áreas insulares e costeiras em diversos pontos do mundo. Destaca o aumento significativo de estudos em 2020 e 2021, especialmente na Ásia, sublinhando a necessidade de utilização deste tipo de tecnologias de monitorização de ambientes costeiros. Tiengo *et al.* (2023) identificam as abordagens existentes, no contexto da deteção remota, assim como também identifica lacunas, apontando desenvolvimentos científicos futuros neste domínio.

Na análise da Baía da Babitonga, um estuário localizado em Santa Catarina, Brasil, investiga-se o impacto das mudanças climáticas, especialmente o aumento do nível médio da água do mar, na circulação oceanográfica e nos processos de mistura oceânica na

@ Corresponding author: fpinto@fe.up.pt

1 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Porto, Portugal.

2 Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Matosinhos, Portugal.

3 Centro de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Algarve, Faro, Portugal

baía (Cunha e Abreu, 2023). Tendo como base o estudo de modelação hidrodinâmica, a investigação revela uma redução na taxa de renovação e o aumento no tempo de residência da água, até 2100, sublinhando a vulnerabilidade da baía e a necessidade de implementar estratégias de adaptação e mitigação face a alterações climáticas.

Ainda no contexto da dinâmica sedimentar, Amorim *et al.* (2023), realizam uma análise comparativa entre os principais métodos de contenção de erosão costeira, avaliando indicadores e aspetos operacionais relacionados com a sua viabilidade técnico-económica. Amorim *et al.* (2023) salientam a necessidade de adequação de cada método às particularidades do ambiente local, sendo essencial ao processo de escolha, a observação e diagnóstico dos indicadores: durabilidade da obra, disponibilidade de materiais para construção, tipos de transporte, custos e benefícios, impactos socioambientais, mão de obra qualificada e tipo de manutenção a longo prazo.

Sabendo-se que uma compreensão aprofundada das dinâmicas sedimentares é crucial para o desenvolvimento de estratégias que assegurem uma navegação segura e eficiente, essencial para o comércio marítimo, os estudos anteriores destacam desafios, identificam melhorias e sublinham a necessidade de adaptação perante as alterações climáticas em curso, de forma a preservar as regiões costeiras e garantir a sua sustentabilidade. Deste modo, os estudos apresentados constituem novos casos de estudo nesta matéria, com especial destaque para locais com infraestruturas portuárias de relevo ou sujeitos a fatores delicados no que respeita à dinâmica costeira local, como por exemplo as alterações climáticas, ou o uso e cobertura do solo em regiões insulares, entre outras possibilidades.

COASTAL ZONES: PORTS AND SEDIMENT DYNAMICS

The sedimentary dynamics play a crucial role in shaping and evolving coastal zones, directly impacting global infrastructures and port basins. Sediment transport along the coast and sedimentation in ports have significant implications for navigability and the safety of port operations. A precise understanding of these dynamics is essential for proper planning and management of port infrastructures, including the maintenance of navigation channels and other crucial aspects. Additionally, port infrastructures play a vital role in global trade activities, connecting regions and driving economic development. Therefore, the interaction between sedimentary dynamics and port infrastructures is essential to ensure the operational efficiency and environmental sustainability of these facilities on a global scale.

*Recognizing the strategic importance of waterways and ports for Brazil's international projection, Neves *et al.* (2023a) emphasize the relevance of understanding sedimentary dynamics for the Port of Tubarão, highlighting the need for periodic dredging to ensure navigability. The integrated analysis of historical data and hydrodynamic and sedimentary parameters of the Bays of Vitória and Espírito Santo reveals various challenges, with Vitória Bay identified as the main source of sediment material.*

*For the same case study, the Port of Tubarão, Neves *et al.* (2023b) underscore the importance of periodic dredging for navigability within ports, identifying necessary improvements in understanding sedimentary dynamics in the region. The collection and analysis of 91 sediment samples emphasize the importance of knowing the quality of dredged material. The possibility of adverse impacts during and after dredging projects emphasizes the importance of understanding the quality of dredged material and sedimentary dynamics in the port area for effective planning and management, ensuring the effective mitigation of negative environmental impacts.*

*Tiengo *et al.* (2023) use satellite images and multispectral data to detect changes in land use and land cover in island and coastal areas worldwide. They highlight a significant increase in studies in 2020 and 2021, especially in Asia, emphasizing the need for monitoring technologies. Tiengo *et al.* (2023) identify existing approaches but also pinpoint gaps, indicating future developments in this field.*

In the analysis of Babitonga Bay, an estuary located in Santa Catarina, Brazil, the impact of climate change, especially the rise in sea level, on circulation and mixing processes in the bay is investigated (Cunha and Abreu, 2023). Based on hydrodynamic modeling, the research reveals a reduction in the renewal rate and a corresponding increase in water age until 2100, indicating the bay's vulnerability and the need to implement adaptation and mitigation strategies.

In the context of sedimentary dynamics, Amorim et al. (2023) conduct a comparative analysis of the main coastal erosion control methods, assessing indicators and operational aspects related to their technical and economic viability. Amorim et al. (2023) emphasize the need to adapt each method to local conditions, where the approach selection should account for indicators such as the durability of the structure, availability of construction materials, transportation, costs and benefits, socio-environmental impacts, workers, and the requirements for the long-term maintenance.

Understanding sedimentary dynamics is crucial for developing strategies that ensure safe and efficient navigation, essential for maritime trade. The previous studies highlight challenges, identify improvements, and underscore the need for adaptation to ongoing climate changes to preserve coastal regions and ensure their sustainability. Therefore, the presented studies constitute new case studies in this matter, with a particular focus on locations with prominent port infrastructures or subject to delicate factors regarding local coastal dynamics, such as climate change or land use and land cover in island regions, among others.

REFERÊNCIAS/REFERENCES

Neves, R.C.N., Quaresma, V.S., Bastos, A.C. (2023a). Influência da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar da baía do espírito santo na variabilidade do padrão. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 22 (4). pp. 285-297. DOI: 10.5894/rgci-n531.

Neves, R.C.N., Quaresma, V.S., Bastos, A.C. (2023b). Proveniência dos sedimentos finos para o porto de Tubarão, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 22 (4). pp. 285-297. DOI: 10.5894/rgci-n533.

Tiengo, R., Palácios-Orueta, A., Uchôa, J., Gil, A. (2023). Remote sensing approaches for land use/land cover change in coastal areas and oceanic islands: an open science-based systematic review. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 22 (4). pp. 285-297. DOI: 10.5894/rgci-n552.

Cunha, C.N., Abreu, A.C. (2023). Mixing process evaluation due to sea level rise in Babitonga bay, Brazil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 22 (4). pp. 285-297. DOI: 10.5894/rgci-n548.

Silva de Amorim, E., Alves, Gaby Carvalho, Sampaio, Rayane Gabriella Pereira da Silva, Girlândia de Moraes, Dantas, Pedro Henrique, Teles, João Victor de Arruda, Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz, Bezerra, Jonas da Silva (2023). Análise da viabilidade técnica-econômica das estruturas de contenção à erosão costeira Technical-economic feasibility analysis of coastal erosion containment structures. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 22(4). DOI: 10.5894/rgci-n553.

INFLUÊNCIA DA HIDRODINÂMICA E DINÂMICA SEDIMENTAR DA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO NA VARIABILIDADE DO PADRÃO DE ASSOREAMENTO NO PORTO DE TUBARÃO, BRASIL

Rafael Carvalho Neves^{@ 1}, Valéria da Silva Quaresma¹, Alex Cardoso Bastos²

RESUMO: Tendo em vista a importância das vias navegáveis e portos brasileiros para o comércio exterior do país, além da crescente demanda por melhoria da infraestrutura portuária para aumento da competitividade do Brasil perante o mundo, o presente artigo tem como objetivo principal avaliar o processo de assoreamento no Porto de Tubarão, Vitória-ES. Por ser um dos portos mais importantes do Brasil e realizar dragagens de manutenção periódicas para manter a sua área marítima navegável, o entendimento da dinâmica sedimentar da região é fundamental para o correto planejamento de obras de dragagem e discussões sobre segurança da navegação na região. A partir da análise integrada de dados históricos de pluviometria de Vitória-ES, vazão do rio Santa Maria da Vitória, hidrodinâmicos e sedimentares da Baía de Vitória (BV) e Baía do Espírito Santo (BES), bem como avaliação da evolução batimétrica entre 2015 e 2018 no Porto de Tubarão, foi possível identificar o fluxo resultante da BV para a BES como a principal fonte de material sedimentar na região. Durante o período de baixa pluviosidade, entre junho de 2015 e abril de 2017, houve uma menor taxa de assoreamento na área do porto (0.02 m/ano) decorrente do pequeno aporte de material sedimentar da BV e região costeira adjacente, enquanto entre maio de 2017 e abril de 2018, foi observada a maior taxa de assoreamento na área do porto (0.35 m/ano) em função da maior pluviosidade e atuação de correntes resultantes preferencialmente para NE/E na BES, associadas à elevação da frequência da incidência de ondas de SE/S. Os resultados e as discussões apresentadas nesse estudo evidenciam a importância do monitoramento e avaliação contínua dos parâmetros meteo-oceanográficos e batimétrica como base para o entendimento da complexa dinâmica sedimentar observada nas regiões portuárias.

Palavras-chave: assoreamento, hidrodinâmica, batimetria.

ABSTRACT: The importance of Brazilian waterways and ports for the country's foreign trade and the growing demand for improving port infrastructure to increase Brazil's competitiveness in the world inspired the main objective of this study to evaluate the siltation process in the Tubarão Port, Vitória-ES. Due periodic maintenance dredging necessity to keep its maritime area navigable, the understanding improvement of sedimentary dynamics in Tubarão Port area is imperative, in order to provide scientific basis for discussions, such as planning dredging projects and navigation safety. Starting from the integrated analysis of historical precipitation in Vitória-ES, flow in the Santa Maria da Vitória River and hydrodynamic and sedimentary data from Vitória Bay (BV) and Espírito Santo Bay (BES) and later integrating with bathymetric evolution between 2015 and 2018 at Tubarão Port, it was possible to identify the resulting flow from BV to BES as the main source of sedimentary material in the region. During the low precipitation period, between June 2015 and April 2017, there was a lower siltation rate in the port area (0.02 m/year) due the small sedimentary material supply from BV and the adjacent coastal region. While between May 2017 and April 2018, the highest siltation rate was observed in the port area (0.35 m/year) due the increased rainfall and currents acting preferentially to NE/E at BES, associated with rise of SE/S waves frequency. Results and discussions presented in this study show the continuous meteo-oceanographic and bathymetric monitoring importance as basis for understanding the complex sediment dynamics observed in port regions.

Keywords: siltation in harbor, hydrodynamics, bathymetry.

@ Corresponding author: rafaeloceanografia@yahoo.com.br

1 vdsquaresma@gmail.com

2 alexcardosobastos@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O comércio por via marítima representou mais de 77% do comércio exterior do Brasil no ano de 2019, antes dos impactos da pandemia de Covid-19 na economia, contabilizando aproximadamente US\$48 bilhões de balança comercial positiva para o país (ATP, 2019). Entretanto, o país ocupa somente a posição 91^a na eficiência dos serviços portuários (WEF, 2020) devido a latente demanda por melhoria de sua infraestrutura portuária, bem como necessidade de adequação das vias navegáveis dos portos brasileiros para recebimento de navios maiores, em decorrência da tendência mundial de construção para redução do custo do frete e impactos ambientais (English e Hackston, 2013).

Há décadas, a manutenção da profundidade das vias de navegação é um dos principais desafios de infraestrutura dos portos brasileiros (IPEA, 2009), pois como consequência do processo de assoreamento natural e intensificado por ações antrópicas, há a necessidade de realização de dragagens periódicas para manutenção da navegabilidade segura nessas áreas portuárias (Fettweis *et al.*, 2016). Além do alto custo das obras de dragagem, essas intervenções geram grandes conflitos ambientais e sociais, principalmente relacionados ao nível de contaminação do material dragado. A ressuspensão do sedimento, local de despejo e posterior retrabalhamento desse material pela hidrodinâmica local podem causar impactos negativos à biota aquática e afetar a qualidade de vida de atores regionais, como pescadores, moradores e turistas (Theodoro, 2005).

Nas regiões costeiras, o sedimento inconsolidado advém principalmente do aporte dos rios e estuários, retrabalhamento do sedimento nas praias, atividades pesqueiras e comerciais (Paphitis e Collins, 2005). Entretanto, a compreensão dos processos hidrodinâmicos atuantes nos ambientes portuários é um desafio, devido à interação complexa de ondas, marés, correntes, processos atmosféricos, morfologia do fundo e configuração geométrica do porto (Martins *et al.*, 2004; van Rijn, 2016), cuja ação conjunta influencia a capacidade de erosão, transporte e consequentemente a distribuição espacial do sedimento e de suas propriedades.

A partir da avaliação dos processos responsáveis pelo assoreamento do Porto de Tubarão, Brasil, o objetivo principal do presente estudo é apresentar a importância do monitoramento contínuo e análise integrada de diferentes dados ambientais para gestão mais assertiva do assoreamento, planejamento

de atividades de dragagem para reestabelecimento das profundidades de projeto e melhoria das tomadas de decisão em áreas portuárias. Para tanto, análises da dinâmica sedimentar com dados coletados *in situ* foram desenvolvidas para diferentes regimes pluviométricos e meteo-oceanográficos da área de estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O Porto de Tubarão é um dos maiores portos do Brasil em termos de comercialização de carga e está situado na Baía do Espírito Santo (BES), Estado do Espírito Santo (Figura 1). Essa região está interligada com a Baía de Vitória (BV), onde se encontra instalado o Porto de Vitória e uma das maiores áreas de manguezal em área urbana do Brasil com 18 km² (ICMBIO, 2018).

A região de estudo apresenta micromaré (amplitudes <1.7m) (DHN, 2022) e pluviosidade média de 1350 mm/ano, com meses de verão mais chuvosos e meses de inverno mais secos (INCAPER, 2020). O rio Santa Maria da Vitória (SMVT) é o principal afluente da BV e possui vazão natural média aproximada de 10.7 m³/s (SOMA, 2003). Os ventos de leste (E) e nordeste (NE) são predominantes na região, com a passagem de frentes polares e ventos de sul (S) - sudeste (SE) mais frequentes no verão e primavera (Amarante *et al.*, 2009).

2.2 Dados de pluviosidade, vazão e vento

Os dados históricos de pluviosidade em Vitória-ES e da vazão do rio SMVT foram analisados a partir da estação automática A612 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e leituras de nível e utilização da curva de descarga para a estação 57130000 da Agência Nacional de Águas (ANA), respectivamente. Já as informações de vento a 10 m de altura foram extraídas da *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) – National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* para o ponto em frente à BES (lat: -20.3407 e long: -40.0910).

2.3 Cálculo de taxa de assoreamento

A definição das principais áreas de acreção e erosão, bem como o cálculo das taxas de assoreamento foram obtidos a partir da comparação de três levantamentos batimétricos multifeixe realizados no Porto de Tubarão. Os dados analisados foram coletados em junho de 2015, logo após uma dragagem para manutenção das vias de acesso ao porto, no início de maio de 2017 para acompanhamento do assoreamento e no final de abril de 2018, pouco antes do início de uma dragagem de

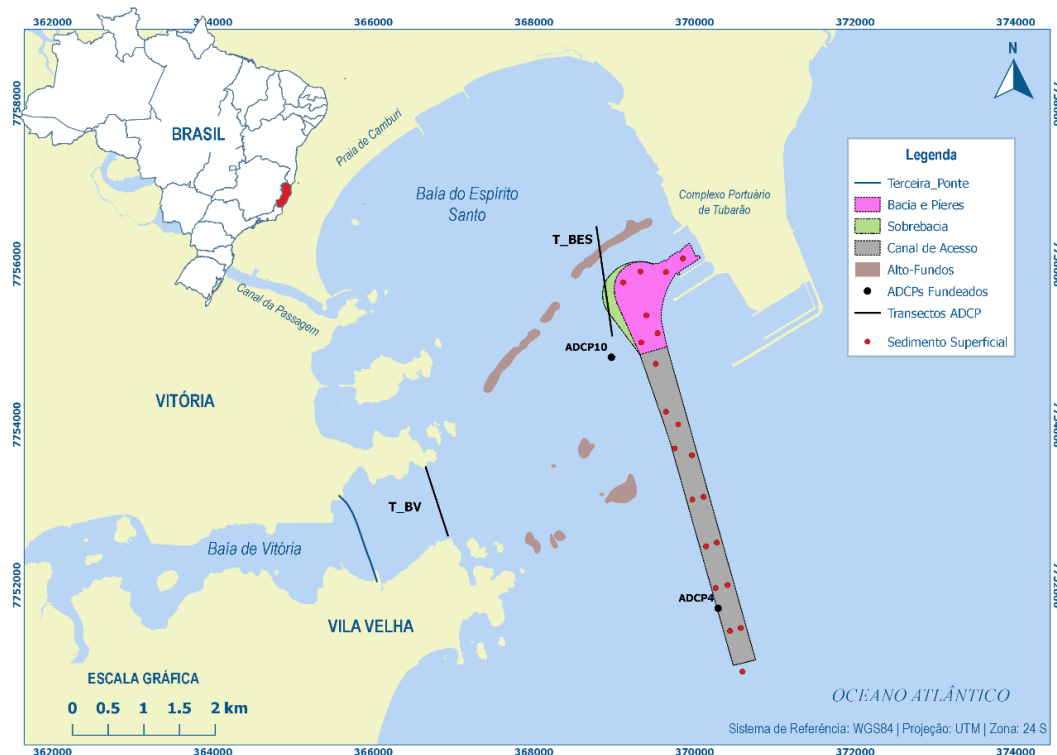


Figura 1. Delimitação da geometria onde os dados batimétricos históricos foram comparados no Porto de Tubarão (áreas rosa, verde e cinza), bem como localização dos pontos de fundeio (pontos pretos) e transectos (linhas pretas) realizados com ADCPs para análise da hidrodinâmica. Os locais de amostragem do sedimento superficial são apresentados pelos pontos vermelhos.

manutenção. Os levantamentos batimétricos foram realizados e posteriormente processados de acordo com as instruções normativas da Marinha do Brasil (NORMAN 25) para qualidade categoria A (DHN, 2017).

Os dados batimétricos processados pelo software Caris 10.4 foram exportados para a camada shoal (mais rasa) e as informações foram utilizadas para gerar modelos digitais de elevação do fundo (MDE), a partir do método de interpolação conhecido como TIN (*Triangulated Irregular Network*) e conexão dos pontos de acordo com a triangulação de Delaunay (Câmara e Medeiros, 1998). As diferenças entre os MDEs foram calculadas pela subtração entre os modelos das diferentes batimetrias, a partir do método da álgebra de mapas no software HYPACK 2018, e posteriormente as taxas de assoreamento por período foram calculadas.

2.4 Hidrodinâmica local

Para análise temporal das ondas atuantes nos períodos entre os levantamentos batimétricos, foram utilizados dados históricos

dos ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profile*) fundeados nas proximidades das boias 4 (ADCP4) e 10 (ADCP10) do Porto de Tubarão entre julho de 2015 e abril de 2018, sendo os padrões de onda separados e analisados para dois períodos distintos, seguindo as coletas dos dados batimétricos.

Além disso, dados de corrente e onda do ADCP4 e ADCP10 coletados entre março de 2019 e julho de 2020 foram utilizados na avaliação da correlação entre as mudanças dos padrões de onda e a alteração nos padrões de circulação na BES. Para tanto, os dados de corrente foram separados em dois grupos, sendo o primeiro observado durante a incidência de ondas de E-SE e o segundo grupo notado durante a incidência de ondas de SE-S. Os dados de corrente também foram divididos em camadas com mesma espessura (~5 m) ao longo da coluna d'água (superfície, meio e fundo).

Perfis horários de velocidade e direção das correntes ao longo da coluna d'água também foram adquiridos com ADCP ao longo de todo ciclo de maré de sizígia (13hs) em dois

transectos do período chuvoso e seco local (Figura 1), sendo as coletas na desembocadura da BV (T_BV) realizadas em 15 de maio e 24 de outubro de 2018, respectivamente, e nas proximidades da sobrebaía do Porto de Tubarão e alto-fundo presente na BES (T_BES) em 16 de maio e 25 de outubro de 2018, respectivamente. Por fim, foram calculados perfis resultantes de corrente ao longo dos ciclos de maré, a partir da decomposição das velocidades paralelas e transversais ao eixo principal do canal da BV (65.3° do norte verdadeiro) e de forma semelhante relativo ao eixo principal do Canal de Acesso do Porto de Tubarão (74.37° do norte verdadeiro).

2.5 Ressuspensão e transporte do sedimento superficial

A partir das informações de teor de água e densidade do sedimento superficial das 21 amostras coletadas no Porto de Tubarão, a avaliação da mobilidade do sedimento superficial foi realizada a partir dos dados hidrodinâmicos obtidos pelos ADCP4 e ADCP10.

O cálculo da tensão de cisalhamento de fundo pela ação combinada de corrente e onda (τ_{cw}) foi desenvolvido a partir do modelo de Soulsby (1995), onde foram utilizadas a Energia Cinemática Turbulenta (TKE) (τ_c) para cálculo da tensão de cisalhamento de fundo devido as correntes e a equação de van Rijn (1993) para cálculo da tensão de cisalhamento de fundo devido às ondas (τ_w). O cálculo da tensão crítica para ressuspensão de sedimento do fundo (τ_{cr}) foi realizado através da equação de Taki (2001) para sedimento coesivo, uma vez que todas as amostras dentro da área do porto apresentaram tais características.

3. RESULTADOS

3.1 Fluxos entre Baía de Vitória e Baía do Espírito Santo

Os períodos chuvoso e seco da área de estudo foram definidos a partir da precipitação acumulada em Vitória/ES e vazão média do rio SMVT (Tab. 1). A análise dos dados pluviométricos e fluviométricos apresentou precipitação acumulada e vazão média quatro vezes maior no período chuvoso (85.8 mm e 26.4 m³/s) em relação ao período seco (21.2 mm e 6.9 m³/s).

A partir da análise integrada dos perfis de corrente ao longo dos ciclos de maré, percebe-se que o sentido resultante das correntes foi oposto nos períodos monitorados (Figura 2). Ou seja, o fluxo resultante durante o período chuvoso tendeu a se dirigir da BV para a BES, com intensidades máximas superficialmente durante a vazante de 1.9 m/s e vazão resultante de 2583 m³/s,

enquanto no período seco, observou-se uma tendência resultante de entrada das correntes da BES para a BV, com intensidades máximas de 1.5 m/s, ao longo de toda a coluna d'água durante a enchente, e vazão resultante de -1579 m³/s.

3.2 Hidrodinâmica da Baía do Espírito Santo

Entre fevereiro de 2019 e julho de 2020, as ondas comumente incidiram do quadrante E-S na BES, com a altura significativa (Hs) entre 1 e 2 m na entrada da BES (ADCP4) e abaixo de 1 m na sua região central (ADCP10). O período de pico primário mais frequente foi o de ondas locais entre 5 e 10 s.

Observou-se a tendência de atuação de correntes fracas (<0,3 m/s) ao longo de toda a coluna d'água, com intensidades ligeiramente mais intensas superficialmente (até 5 metros de profundidade). A direção preferencial das correntes mudou conforme o padrão de ondas atuante. Durante a atuação de ondas de E-SE, as correntes tenderam a se direcionar de forma resultante para O-SE na entrada da BES (Figura 3a), enquanto a direção resultante das correntes para NE-E foi observada durante a atuação de ondas de SE-S (Figura 3b).

A área interna da BES apresentou uma mudança mais sutil no padrão de circulação abaixo da camada superficial, com correntes direcionadas preferencialmente para N-NO durante a atuação de ondas de E-SE e (Figura 4a) e deflexão das correntes predominantes para N-E durante a atuação das ondas de SE-S (Figura 4b). Já na camada superficial, o padrão das correntes tendeu a manter o direcionamento entre SE-SO durante a incidência de ondas de E-SE, enquanto as correntes tenderam a oscilar com direcionamento para NE e SO durante a atuação de ondas de SE-S.

Os transectos de corrente na BES realizados durante o período chuvoso coincidiram com a incidência de ondas de SE-S, enquanto durante a coleta no período seco havia incidência de ondas principalmente de E-SE, segundo dados do mesmo período dos dois ADCPs fundeados. As velocidades das correntes mais frequentes foram menores que 0.4 m/s ao longo de toda coluna d'água nos dois períodos de coleta (Figura 5). Durante o monitoramento no período seco, foram observadas correntes preferencialmente orientadas para O-SO ao longo de todo o ciclo de maré, com vazão máxima de -5778 m³/s (para O-SO). Já no período chuvoso, não houve uma direção preferencial das correntes, variando de acordo com o momento do ciclo de maré e profundidade. As vazões máximas foram de -899 m³/s (para O-SO) na maré enchente e 504 m³/s (para NE-E) na maré vazante, indicando um maior fluxo paralelo ao canal nesse período.

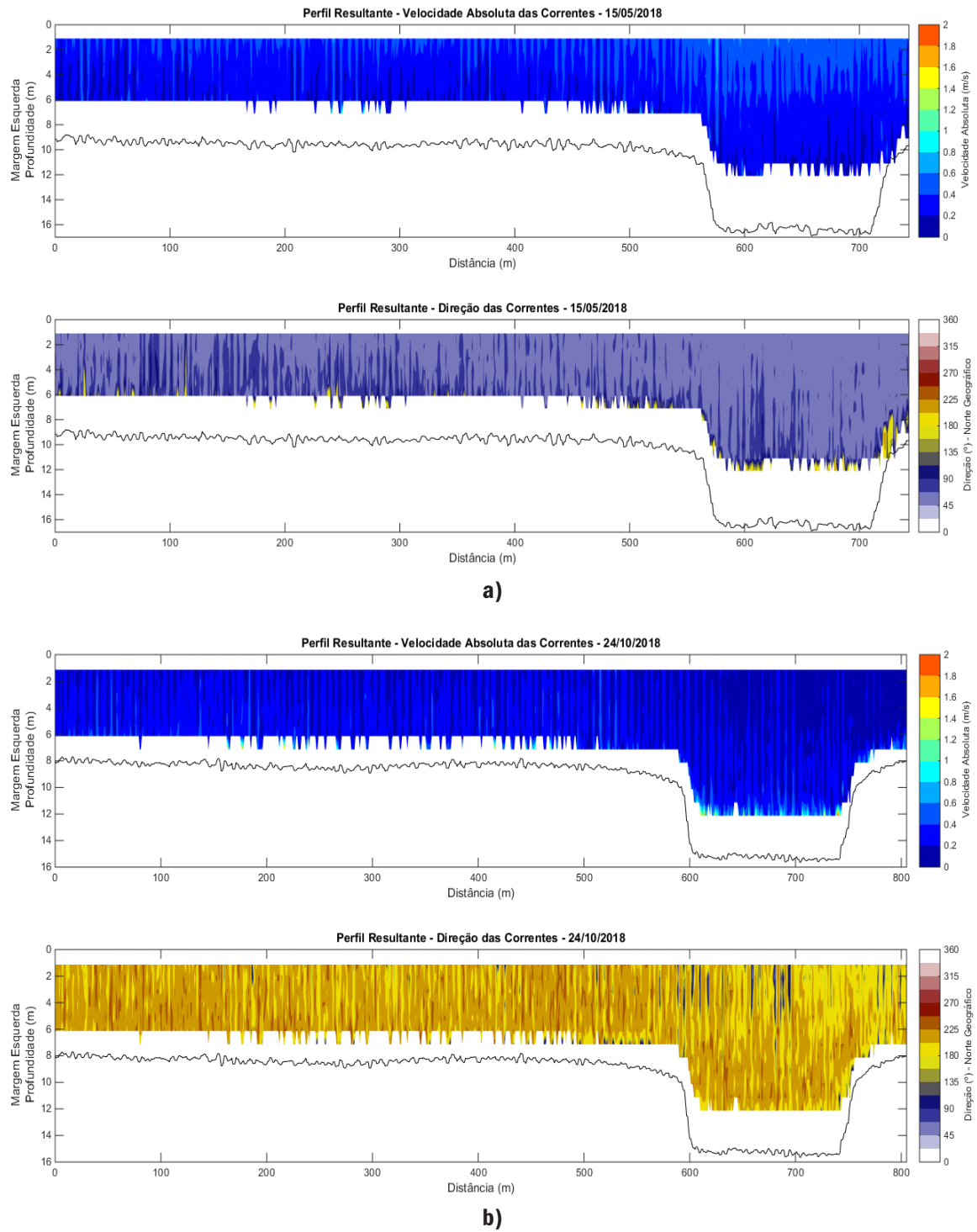
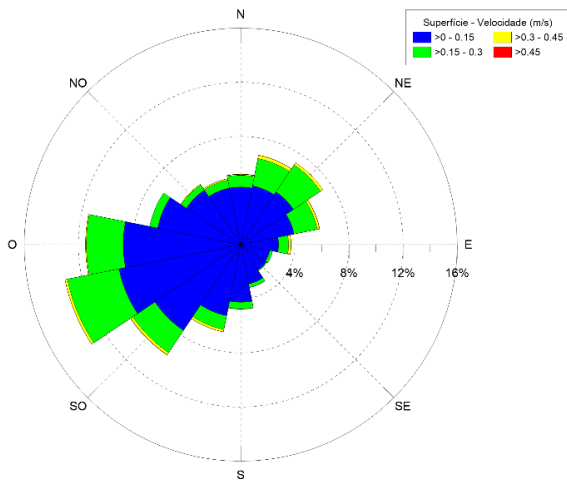
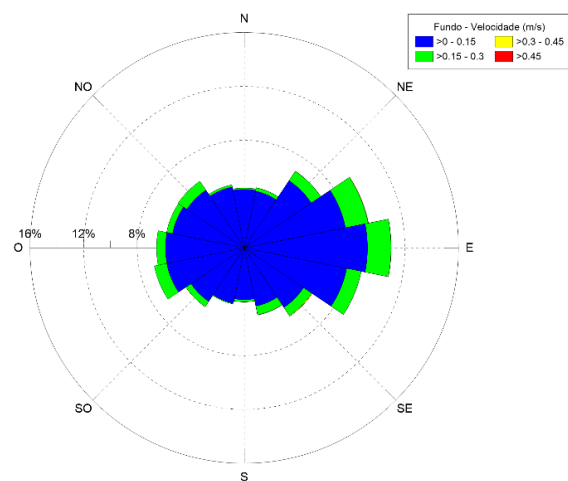
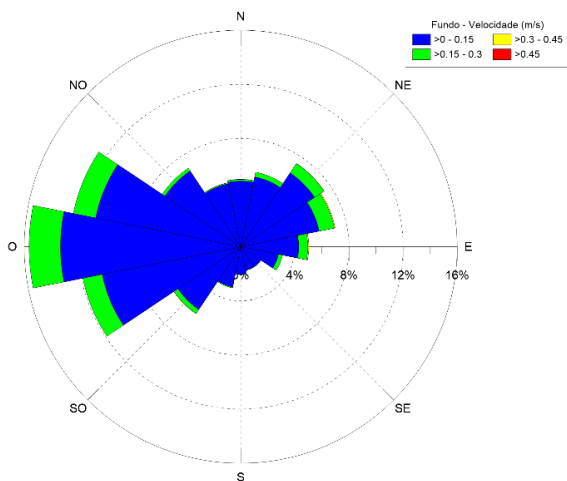
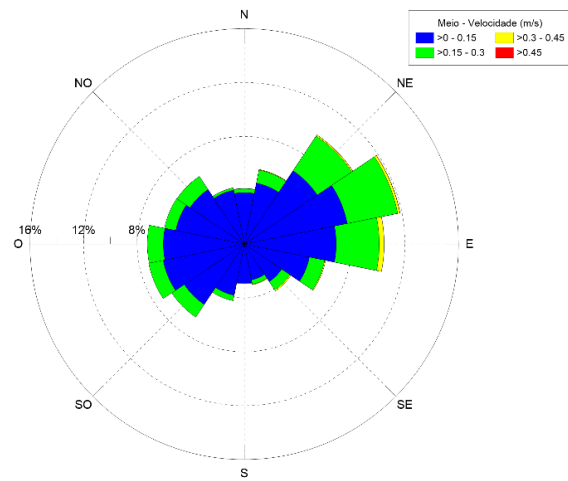
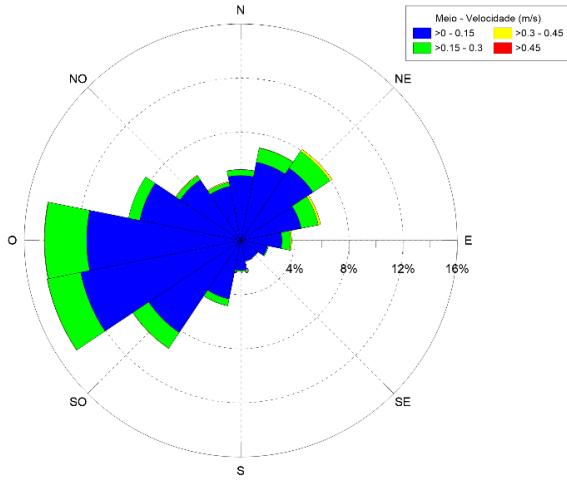
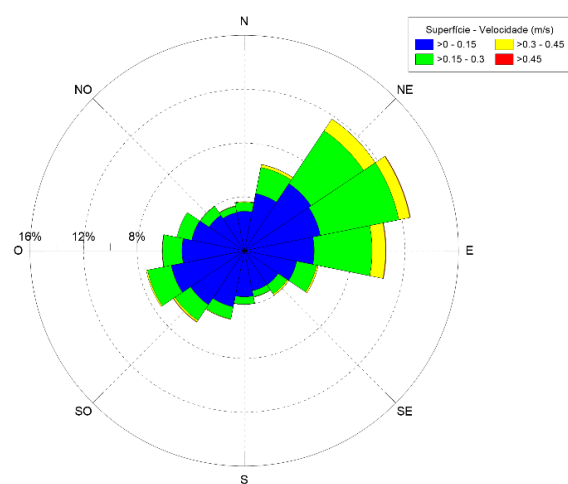


Figura 2. Perfis resultantes da velocidade e direção das correntes residuais observadas na desembocadura da BV nos períodos chuvoso (a) e seco (b).

Fundeio ADCP4 - 03/2019 a 07/2020 - Ondas E-SE



Fundeio ADCP4 - 03/2019 a 07/2020 - Ondas SE-S



a)

b)

Figura 3. Padrão de correntes médias observadas no ADCP4 entre março de 2019 a julho de 2020 ao longo da coluna d'água (superfície, meio e fundo), sendo: (a) durante a atuação de ondas incidentes de E-SE e (b) para durante ondas incidentes de SE-S.

Correntes ADCP10 - 03/2019 a 07/2020 - Ondas E-SE

Correntes ADCP10 - 03/2019 a 07/2020 - Ondas SE-S

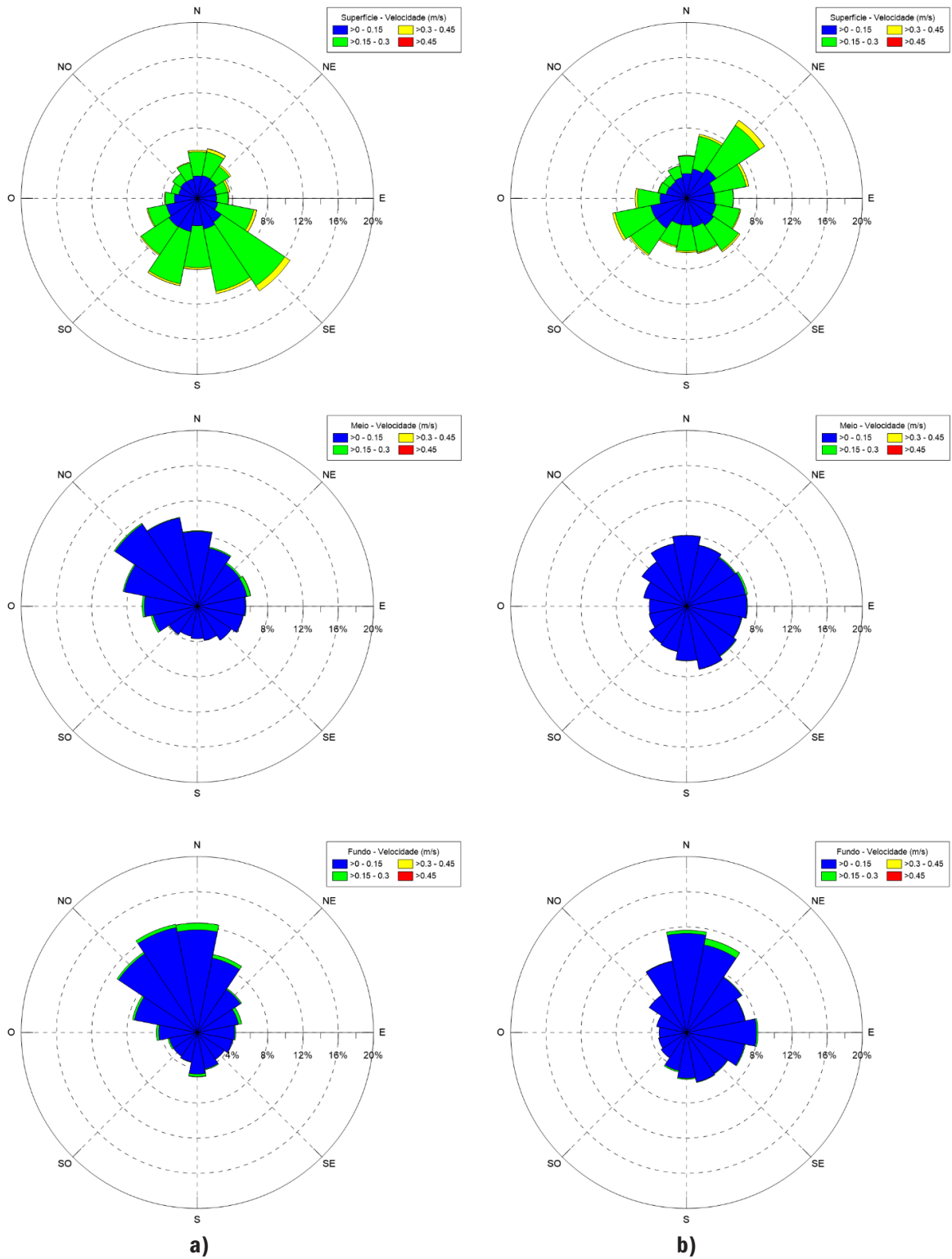


Figura 4 – Padrão de correntes médias observadas no ADCP10 entre março de 2019 a julho de 2020 ao longo da coluna d’água (superfície, meio e fundo), sendo: (a) durante a atuação de ondas incidentes de E-SE e (b) para durante ondas incidentes de SE-S.

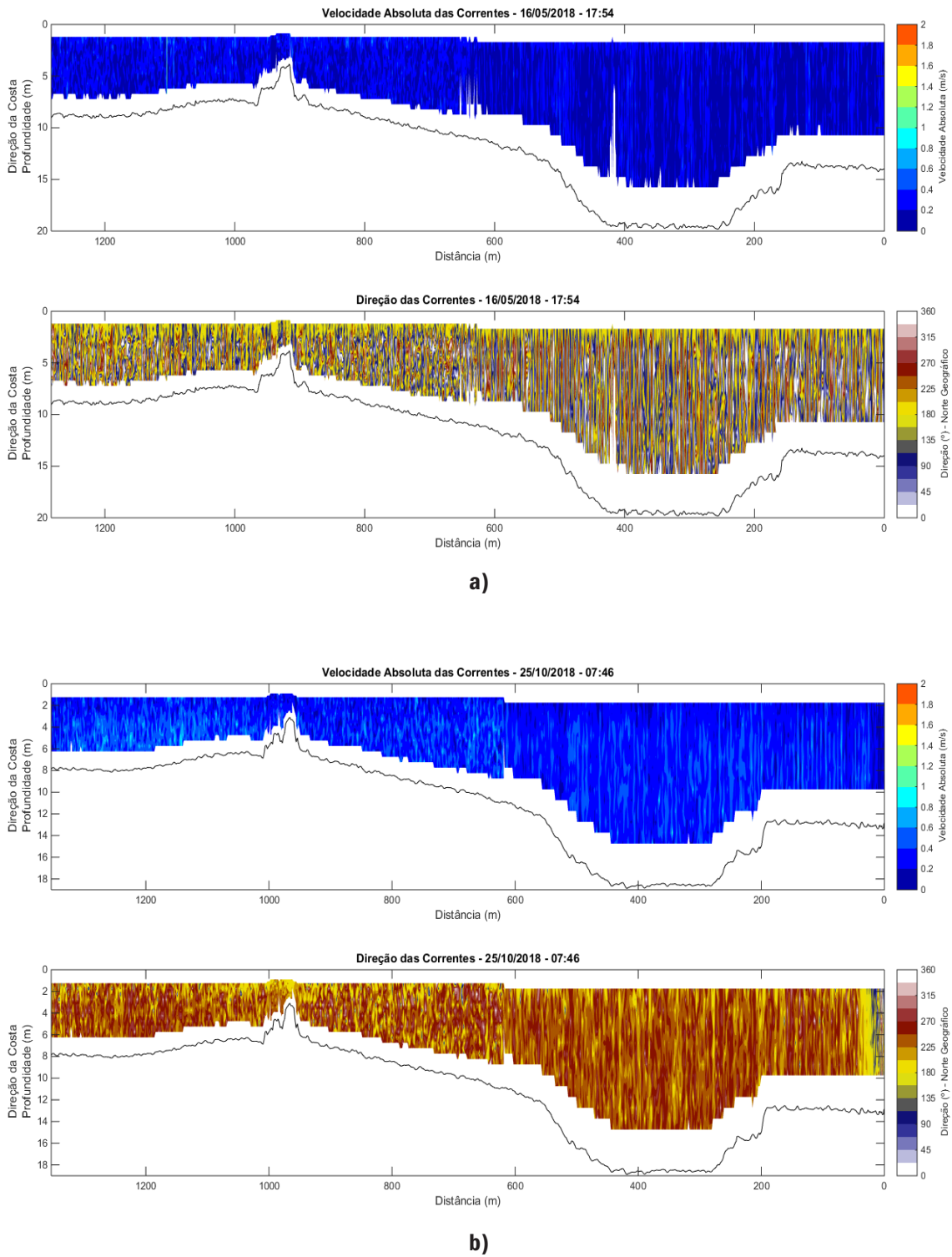


Figura 5. Perfis de velocidade e direção das correntes BES durante o período chuvoso com atuação de ondas de SE-S e seco com atuação de ondas de E-SE, sendo representados por (a) chuvoso na máxima vazante, (b) seco na máxima vazante, (c) chuvoso na máxima enchente e (d) seco na máxima enchente.

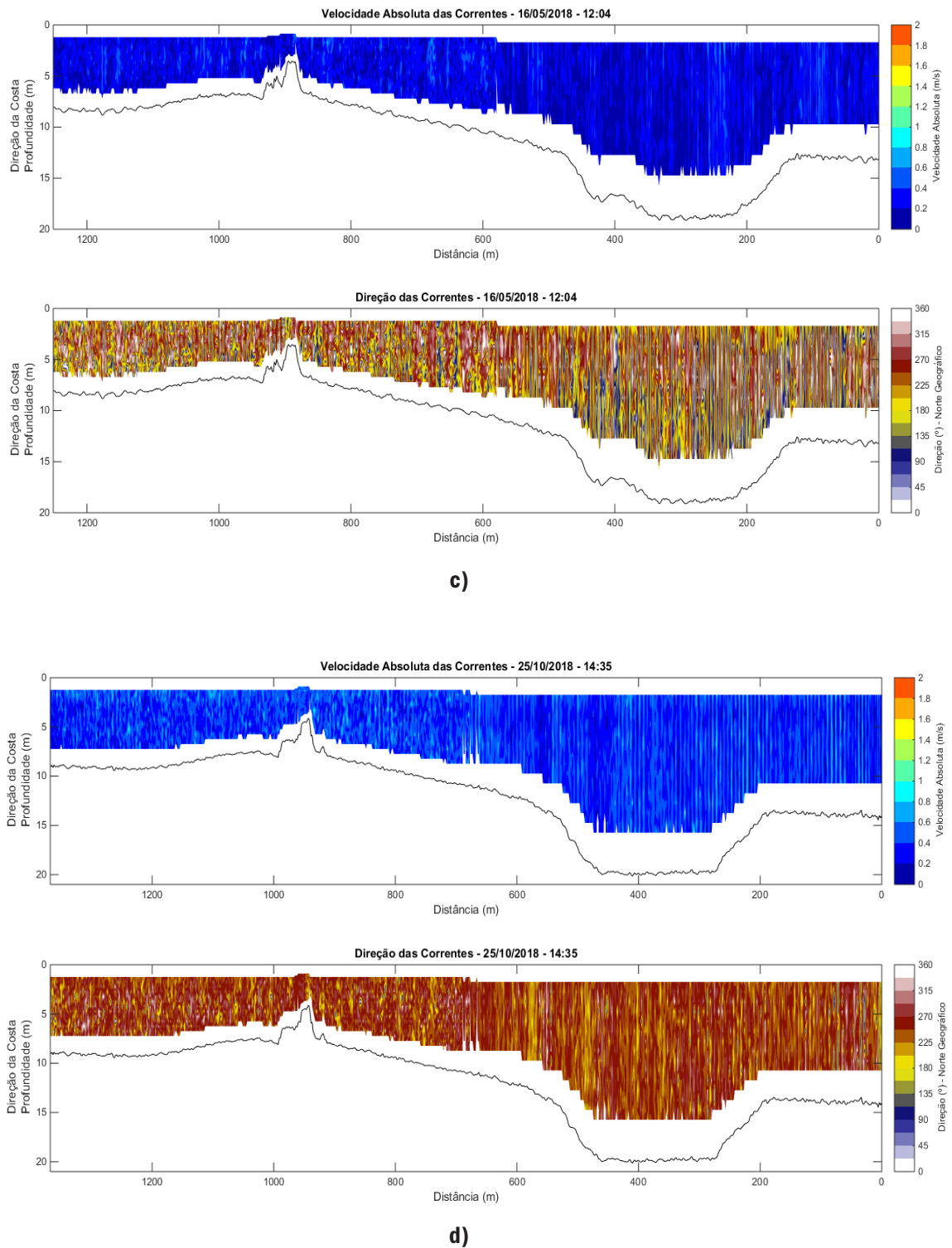


Figura 5. (continuação) Perfis de velocidade e direção das correntes BES durante o período chuvoso com atuação de ondas de SE-S e seco com atuação de ondas de E-SE, sendo representados por (a) chuvoso na máxima vazante, (b) seco na máxima vazante, (c) chuvoso na máxima enchente e (d) seco na máxima enchente.

3.3 Espessura do sedimento e taxa de assoreamento

A área analisada do porto com aproximadamente 1,97 km² apresentou uma taxa de assoreamento de 15 cm/ano entre julho de 2015 a abril de 2018 (Tabela 1), sendo a maior taxa observada no Canal de Acesso (17 cm/ano) e menor taxa verificada na sobrebaía (3 cm/ano). Entretanto, o assoreamento no Porto de Tubarão ocorreu de forma não linear nesse período (Figura 6b,c), com maiores taxas entre maio de 2017 a abril de 2018 (35 cm/ano) em todas as áreas analisadas, quando comparadas as taxas verificadas entre julho de 2015 a abril de 2017 (2 cm/ano). O sedimento inconsolidado tendeu a se concentrar principalmente no sopé dos taludes, norte da Baía de Evolução e entre o Píer 2 e Píer 1 Norte (Figura 6a), associado ao sopé do talude existente entre eles. Uma menor acreção ou a ocorrência de erosão foi observada na parte central do Canal de Acesso e Baía de Evolução, onde se situa a rota principal de navegação e manobra dos navios, respectivamente.

3.4 Mobilidade do sedimento superficial

Das 21 amostras de sedimento superficial analisadas, 20 foram classificadas como silte, sendo os maiores diâmetros próximos de areia fina localizados na parte externa do Canal de Acesso do Porto de Tubarão. As amostras apresentaram em sua maioria mais de 60% de água, com diâmetro mediano (D50)

em 7.22 µm e a tensão crítica mediana para ressuspensão de sedimento do fundo em 0.1 N/m². A partir da análise da tensão de cisalhamento com os dados de corrente e onda, verificou-se que em mais de 90% do tempo o sedimento superficial encontrado no canal é ressuspensionado e transportado em torno da área do porto (Tabela 2).

4. DISCUSSÃO

4.1 Aporte sedimentar da Baía de Vitória na Baía do Espírito Santo

Assim como observado por Garonce e Quaresma (2014), a circulação na desembocadura da BV foi principalmente influenciada pela oscilação das marés e diferença de aporte fluvial entre os períodos amostrais. A direção resultante das correntes ao longo de todo perfil apresentou sentido BV para BES no período chuvoso (Figura 3a) e se enquadra no padrão de circulação residual conhecido como “tidal pumping” ou bombeamento de maré, onde o movimento é governado pela maré de sizígia que mantém toda a coluna d’água bem misturada (Dyer, 1995). Como a descarga fluvial foi intensa e suficiente para sobrepujar o efeito da maré, o sentido resultante da água foi para fora do estuário.

Tabela 1. Taxas de assoreamento calculadas para o Porto de Tubarão em diferentes períodos.

PERÍODO	ÁREA	VOLUME (m ³)	TAXA DE ASSOREAMENTO (m ³ /ano)	TAXA DE ASSOREAMENTO (m ³ /mês)	TAXA DE ASSOREAMENTO POR ÁREA (m/ano)
Julho/2015 - Abril/2017	Bacia	9587.3	5229.4	435.8	0.01
	Sobrebaía	-8547.0	-4662.0	-388.5	-0.04
	Canal	77510.2	42278.3	3523.2	0.04
	Total	78550.5	42845.7	3570.5	0.02
Maio/2017 - Abril/2018	Bacia	242857.7	224176.3	18681.4	0.34
	Sobrebaía	20017.9	18478.1	1539.8	0.16
	Canal	480994.1	443994.6	36999.5	0.37
	Total	743869.7	686649.0	57220.7	0.35
Julho/2015 - Abril/2018	Bacia	252445.0	89098.2	7424.9	0.13
	Sobrebaía	11470.9	4048.6	337.4	0.03
	Canal	558504.3	197119.2	16426.6	0.17
	Total	822420.2	290266.0	24188.8	0.15

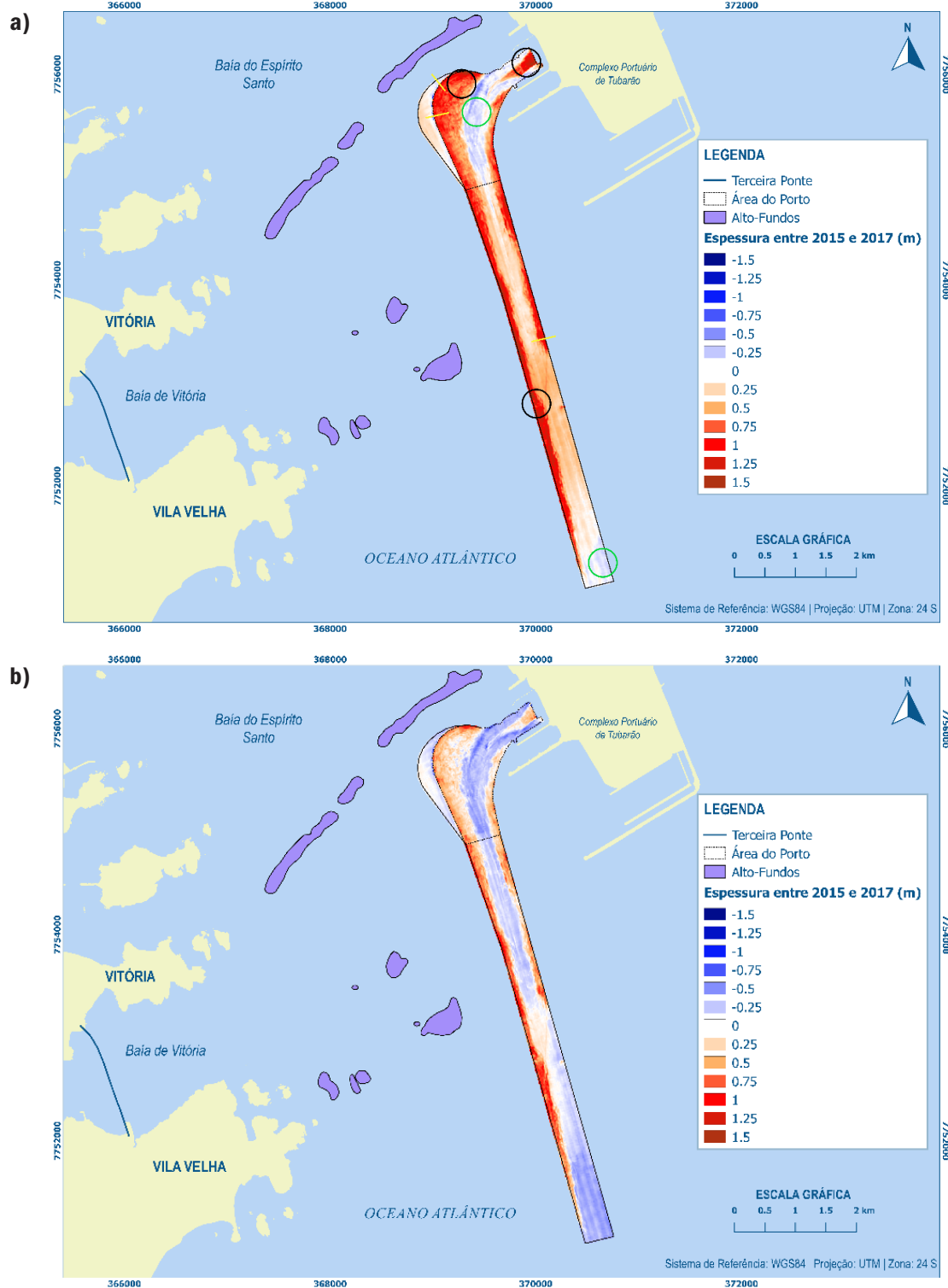


Figura 6. Espessura de sedimento colmatado no Porto de Tubarão entre julho de 2015 a abril de 2018 (a), apresentando diferentes padrões para taxas de assoreamento entre julho de 2015 e abril de 2017 (b) e maio de 2017 a abril de 2018 (c). As áreas de maior acreção e erosão de sedimento são indicadas pelos círculos pretos e verdes, respectivamente. As linhas amarelas indicam os perfis dos taludes analisados entre a sobrebaía e Baía de Evolução (1 e 3) e no Canal de Acesso (2).

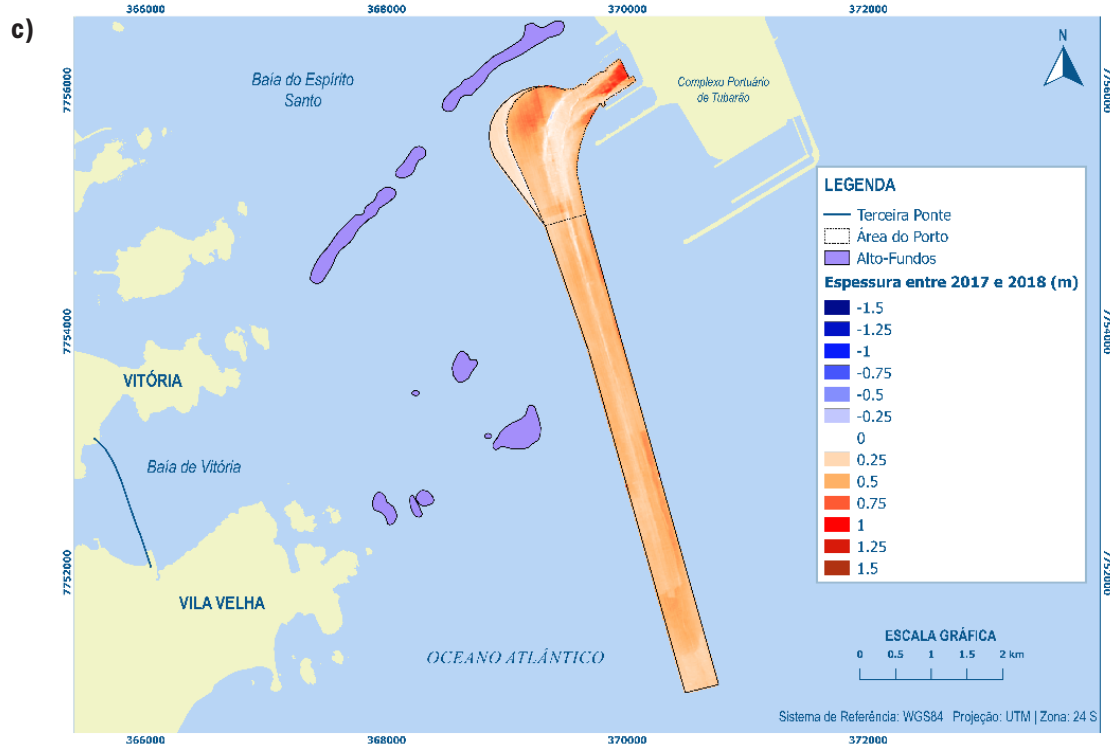


Figura 6. (continuação) Espessura de sedimento colmatado no Porto de Tubarão entre julho de 2015 a abril de 2018 (a), apresentando diferentes padrões para taxas de assoreamento entre julho de 2015 e abril de 2017 (b) e maio de 2017 a abril de 2018 (c). As áreas de maior acreção e erosão de sedimento são indicadas pelos círculos pretos e verdes, respectivamente. As linhas amarelas indicam os perfis dos taludes analisados entre a sobrebaía e Baía de Evolução (1 e 3) e no Canal de Acesso (2).

Ainda durante período chuvoso, o fluxo durante a maré vazante apresentou um padrão de correntes saindo preferencialmente para BES pelo canal e camada superficial (até 5 m de profundidade) e entrando para BV nas regiões mais profundas das margens (Figura 7a). Além disso, a circulação em duas camadas observada nesse período corrobora a presença de água menos salina superficialmente e o predomínio do controle da circulação pelo gradiente baroclínico de pressão longitudinal, conforme circulação gravitacional clássica também descrita por Dyer (1995). Já durante a maré enchente, a circulação em duas camadas não é aparente e o papel desempenhado pela turbulência gerada pela fricção entre o fluxo da maré entrando na BV e a camada menos salina superficialmente saindo para BES passa a ser determinante para geração de um gradiente horizontal (Figura 7b). Dessa forma, observa-se a entrada preferencial das correntes para BV pela margem oeste e uma continuidade de saída das correntes para BES pelo canal e margem leste nesse período.

Durante o período seco, não houve evidência clara de circulação em duas camadas durante a maré vazante (Figura 8a), comprovando o menor aporte no período de águas fluviais na BV. Assim como no período chuvoso durante a maré enchente, as correntes direcionadas para fora da BV ficaram concentradas no canal e margem leste durante a maré vazante do período seco, sugerindo a existência de um gradiente horizontal nessa porção do estuário. Na maré enchente, as correntes para dentro da BV são predominantes em quase todo o transecto e aparentemente há um deslocamento do gradiente horizontal para a margem leste, onde as correntes mais intensas direcionadas para a BES continuam evidentes (Figura 8b). As correntes resultantes direcionadas para BES e limitadas à camada superficial do canal mais profundo sugerem uma circulação característica da atuação de onda progressiva de maré no período seco (Figura 3b), conforme proposto por Valle-Levinson *et al.* (2009), apesar de existir uma defasagem entre a velocidade das correntes e a elevação da maré.

Tabela 2. Mobilidade do sedimento superficial do Porto de Tubarão, calculada a partir da equação de Taki (2001) para sedimentos coesivos.

AMOSTRA	LOCALIZAÇÃO (WGS 84)		D50 (µm)	Teor Água	Tensão Crítica (N/m ²)	Mobilidade Total	Mobilidade E-SE	Mobilidade SE-S
	X	Y						
P01	370595.4	7750925.8	30.5	39%	0.1	94%	94%	94%
P02	370714.3	7750948.1	901.0	-	0.9	50%	49%	51%
P03	370439.2	7751431.4	9.4	65%	0.1	95%	95%	95%
P04	370573.1	7751468.6	10.9	59%	0.1	95%	95%	95%
P05	370260.8	7751966.8	8.5	63%	0.1	95%	95%	95%
P06	370409.5	7752004.0	7.4	53%	0.1	95%	94%	95%
P07	370141.8	7752487.3	16.4	51%	0.1	95%	94%	95%
P08	370275.6	7752531.9	7.2	56%	0.1	95%	95%	95%
P09	369970.9	7753068.2	6.8	67%	0.1	95%	95%	95%
P10	370110.6	7753101.7	7.0	64%	0.1	95%	95%	95%
P11	369749.6	7753704.8	7.2	60%	0.1	95%	95%	95%
P12	369965.3	7753621.2	6.4	60%	0.1	95%	95%	95%
P13	369641.8	7754162.1	4.8	61%	0.1	93%	94%	91%
P14	369794.5	7754004.4	6.4	61%	0.1	93%	94%	91%
P16	369515.8	7754759.2	5.6	68%	0.1	93%	94%	92%
P17	369537.6	7755140.5	6.9	65%	0.1	93%	94%	92%
P18	369397.7	7755363.5	7.3	69%	0.1	93%	95%	92%
P19	369108.2	7755773.4	6.4	67%	0.1	93%	94%	92%
P20	369323.5	7755908.6	5.4	68%	0.1	93%	94%	92%
P22	369641.4	7755902.4	8.9	53%	0.1	92%	94%	91%
P23	369853.5	7756071.6	6.0	67%	0.1	93%	94%	92%

A partir dos distintos padrões de circulação observados na desembocadura da BV, pode-se esperar uma maior disponibilidade de sedimento em suspensão na BES durante os períodos chuvosos, uma vez que o fluxo resultante para a BES foi verificado ao longo de todo o ciclo de maré neste período, além de haver uma maior tendência de aporte de MPS pelos rios, decorrente da elevação das vazões do rio SMVT no período, e aumento da ressuspensão do sedimento de fundo pela influência da circulação turbulenta na BV, conforme observado durante a campanha chuvosa. O estudo de Garonce e Quaresma (2014) embasa essa inferência, uma vez que o cálculo dos fluxos residuais de MPS foram realizados para os ciclos de maré sizígia, durante as estações seca e chuvosa, e apresentaram um fluxo resultante de MPS saindo da BV para a BES na estação chuvosa e o inverso na estação seca. A alternância entre exportação e importação/retenção de MPS é comum em estuários com atuação de micromarés como observado por Schettini e Trucolo (2009), Pereira *et al.* (2010)

e Costa *et al.* (2016) no Brasil e Defontaine *et al.* (2019) e Mathew e Winterwerp (2020) em outros países.

Durante períodos de grande pluviosidade, a alta vazão dos rios pode causar condições hidrodinâmicas excepcionais nos estuários e região costeira adjacente, segundo Nichols e Biggs (1985). As fortes correntes fluviais e estuarinas destes períodos ressuspendem sedimentos depositados ao longo dos rios e estuários nos momentos de vazão normal e os transportam em direção ao oceano. Meade (1969) também observou que nos momentos de alta vazão, a intrusão salina pode ser empurrada em direção à região costeira e causar um transporte de sedimento diretamente para o oceano.

4.2 Padrão de circulação da Baía do Espírito Santo

A maior ocorrência de ondas com alturas significativas abaixo de 1.5 m está de acordo com a análise de dados realizados por Pianca *et al.* (2010) e Albino *et al.* (2018) na plataforma continental do Espírito Santo (Figura 9). O período de pico das

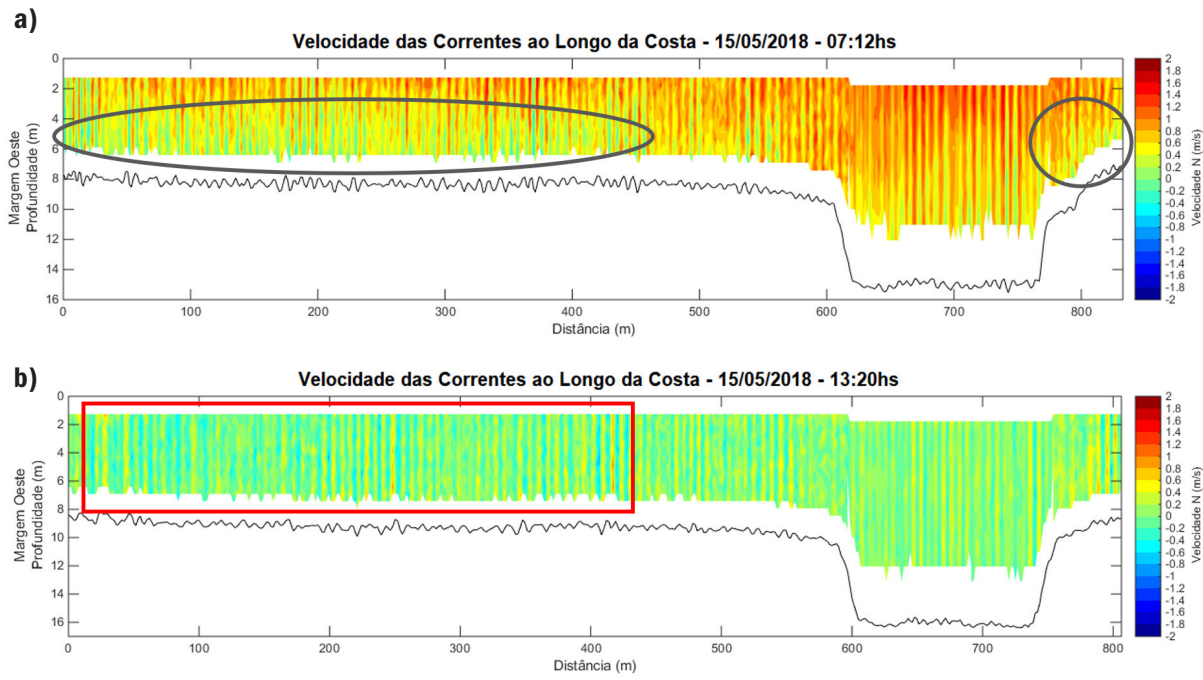


Figura 7. Velocidade ao longo da costa na desembocadura da BV durante o período chuvoso na maré vazante (a) e enchente (b). Os círculos pretos indicam as regiões com a maior presença de correntes para dentro da BV durante a maré vazante e o retângulo vermelho indica a região com mais correntes para dentro da BV durante a maré enchente. Valores positivos para fora da BV.

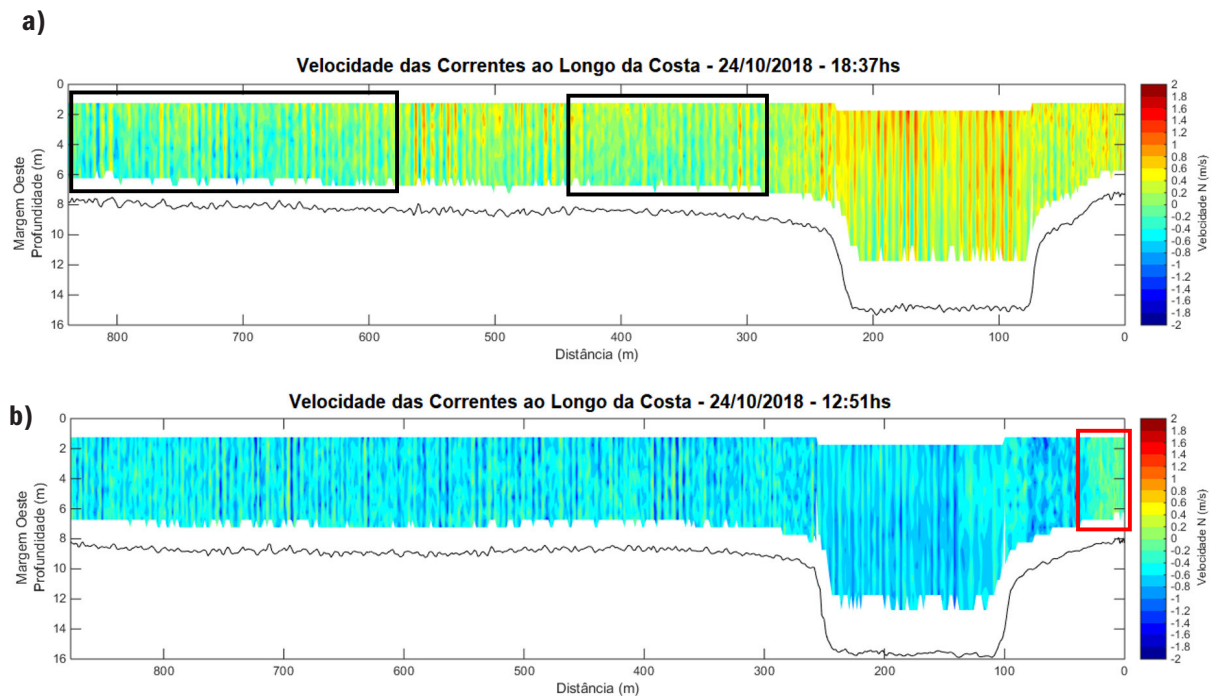


Figura 8. Velocidade ao longo da costa na desembocadura da BV durante o período seco na maré vazante (a) e enchente (b). Os retângulos pretos indicam as regiões com a maior presença de correntes para dentro da BV durante a maré vazante e o retângulo vermelho indica a região com mais correntes para fora da BV durante a maré enchente. Valores positivos para fora da BV.

ondas abaixo de 12 s indica a maior frequência das vagas na área de estudo com a diminuição da altura significativa da onda na região mais interna da BES, uma vez que as ondas incidentes já chegam com parte da sua energia atenuada pela interação com a morfologia e fundo da baía em decorrência dessa área ser mais rasa e abrigada.

A incidência de ondas comumente advindas de E-S na BES é uma resposta à orientação da costa na região de Vitória (sentido NE-SO), refração das ondas pelo fundo e atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), sendo as ondas entre E-SE mais relacionadas a períodos de “tempo bom” com ventos locais predominantes de NE-E, enquanto as ondas de SE-S são resultantes da atuação de sistemas frontais ligados à chegada de frentes frias na região com predominância de ventos da mesma direção (Amarante *et al.*, 2009; Parente *et al.*, 2015; Albino *et al.*, 2018). Quando se compara os padrões das ondas na entrada e na região central da BES, observa-se uma deflexão da direção das ondas incidentes para sul, sendo esta relacionada à difração e refração das ondas pela interação com o enrocamento do porto e a topografia de fundo, respectivamente, conforme também observado por Melo e Gonzalez (1995).

A alternância da direção preferencial das ondas incidentes na BES, advindas de E-SE ou SE-S, coincidiu com a alteração dos padrões de correntes ao longo de toda a coluna d'água na BES (Figuras 3 e 4) e vai de encontro aos resultados dos estudos de Neves *et al.* (2012) e Bastos *et al.* (2014) que classificam a circulação e ressuspensão sedimentar na região do embaixamento da BES como dominada por ondas. Na entrada da BES, a predominância de correntes para O-SO durante a atuação das ondas de E-SE está associada à ocorrência de ventos predominantes de NE-E localmente. A chegada de sistemas atmosféricos frontais na região com ventos de SE-S modificam a circulação local que passa a ter predominância de correntes para NE-E (Figura 9). Esses padrões observados são aderentes à teoria de geração de correntes superficiais pela ação do vento, a qual está relacionada ao cisalhamento do vento superficialmente na coluna d'água e a atuação da força de Coriolis que geram uma deflexão da direção da corrente para a esquerda no hemisfério sul (Riichman *et al.*, 1987; Gnanadesikan e Weller, 1995).

Na região central da BES, a coluna d'água apresentou um padrão de circulação em duas camadas durante a atuação de ondas de E-SE, onde as correntes são direcionadas para SE-SO superficialmente e para N-NO nas camadas mais

profundas (Figura 4a). A corrente superficial preferencialmente direcionada para a saída da BES evidencia a presença de uma corrente transversal gerada a partir da deriva litorânea da praia de Camburi, orientada para NE, durante a incidência desse padrão de ondas (Albino *et al.*, 2016). Já as correntes abaixo de 8 m estão relacionadas às correntes para N-NO induzidas pela difração e refração das ondas incidentes no mole e canal do Porto de Tubarão, respectivamente (Melo e Gonzalez, 1995).

Quando as ondas incidem de SE-S, a sua atuação direta na BES gera correntes transversais que passam a ter importância ao longo de toda a coluna d'água na porção central da baía (Figura 6b). Esse fato também foi observado durante a coleta dos perfis de corrente, próximo à Bacia de Evolução do porto, com atuação de ondas de SE-S (Figura 5a,c), quando as correntes inverteram a sua direção resultante de NE-E (enchente) para SO-O (vazante) ao longo do ciclo de maré. Durante a incidência de ondas de E-SE, as correntes tiveram uma direção preferencial para O-SO ao longo de todo o ciclo de maré (Figura 5b,d).

4.3 Influência do alto-fundo na hidrodinâmica local

A partir da análise dos perfis de correntes coletados próximos à Sobrebaía do porto e alto-fundo da BES, um aumento entorno de 60% nas velocidades das correntes paralelas ao canal foi observado na maré vazante e enchente em ambos os períodos de coleta (Figura 10). Já as correntes perpendiculares ao canal não apresentaram variações significativas espacialmente. Durante atuação de ondas de SE-S, a circulação paralela ao canal tendeu a apresentar duas camadas entre o alto-fundo e a sobrebaía na maré enchente, evidenciando uma subsidência de água próxima ao alto-fundo com as correntes entrando na BES pela camada superficial e se direcionando para dentro da sobrebaía na camada intermediária e de fundo (Figura 10b). Na maré vazante, além do aumento da turbulência com a formação de vórtices próximos ao alto-fundo, a presença de uma corrente contrária ao fluxo superficial, em direção a sobrebaía, é observado na camada intermediária e de fundo (Figura 10a). Durante a atuação de ondas de E-SE na BES, a formação de vórtices nas imediações do alto-fundo continua presente, mas não foi identificado um padrão claro de circulação nessa porção da baía.

Do ponto de vista da mecânica dos fluidos, a velocidade de um escoamento tende a aumentar ao passar de uma seção com maior para menor área, em função da pressão do fluido ser mais elevada na maior área quando comparada a menor, de modo a manter o fluxo constante (Resnick *et al.*, 2012). Além da elevação da velocidade das correntes próximas aos

alto-fundos, Ginsberg e Aliotta (2019) também observaram o crescimento da turbulência com a formação de vórtices, bem como presença de movimentos verticais significativos nessa região, assim como observado no presente estudo. Segundo Schmeeckle *et al.* (1990) e Best (2005), estes movimentos verticais juntamente com a circulação turbulenta gerada pela interação do fluxo com a morfologia de fundo são os principais responsáveis pelos processos de ressuspensão, transporte e deposição próximos de regiões com estruturas rígidas e alto-fundos.

4.4 Assoreamento no Porto de Tubarão

A maior acreção de sedimento próximo ao sopé dos taludes do Canal de Acesso, a norte da Bacia de Evolução e entre os Berços dos navios está associada a dois fatores principais (Figura 6a). Um deles foi a ocorrência de movimentos de massa em algumas regiões de talude entre a dragagem de manutenção finalizada em junho de 2015 e o levantamento hidrográfico de

acompanhamento realizado em maio de 2017 (Figura 11a, b). Nestas regiões, taludes com declividade entorno de 30 graus, em relação à vertical, tenderam a se estabilizar com ângulos maiores que 45 graus, após acomodação de material no sopé. Essa ocorrência é corroborada pela indicação de estabilização de taludes em solo de argila dura à média, conforme presente na região (Loureiro *et al.*, 2013), com inclinações menores do que 1/1 (Brighetti e Martins, 2001). A ação dos efeitos gravitacionais, a partir da remobilização gerada pela atuação das correntes e ondas, também é um importante fator desencadeador de movimentação do sedimento inconsolidado presente no talude para o fundo do canal (van Rijn, 2018). Não foram observados movimentos de massa entre maio de 2017 e abril de 2018, uma vez que a declividade dos taludes nos dois momentos foi similar. Vale ressaltar que essas instabilidades no talude foram identificadas pontualmente nas áreas entre a Sobrebaía e Bacia de Evolução e em partes do Canal de Acesso.

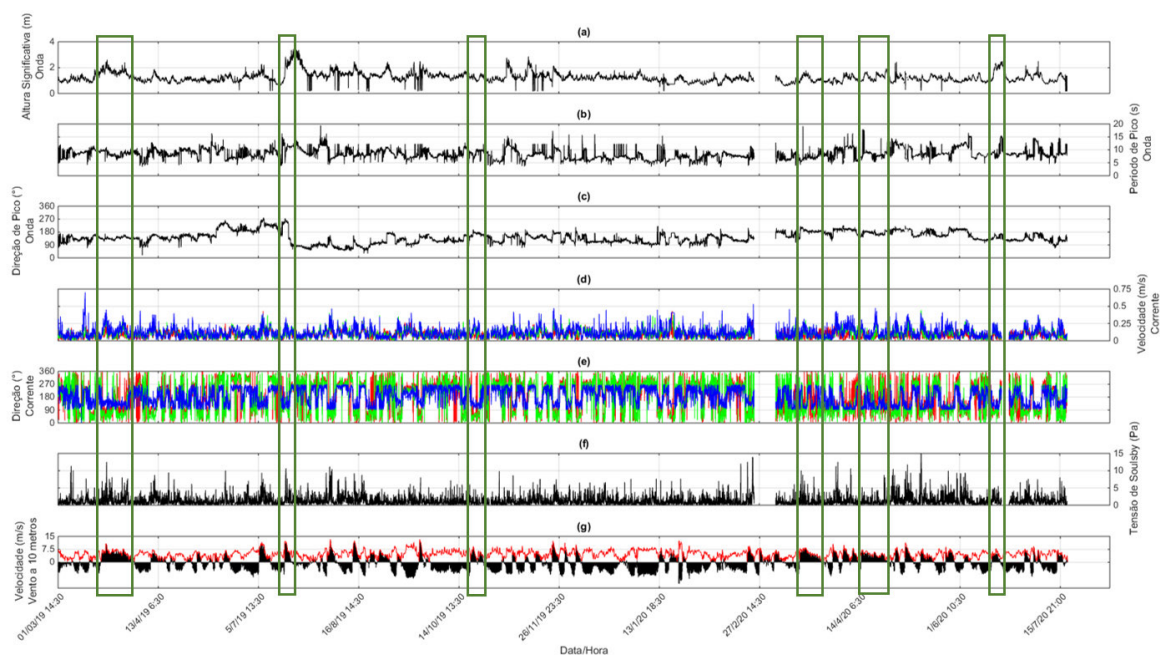


Figura 9. Integração dos dados hidrodinâmicos coletados entre março de 2019 e julho de 2020 na entrada da Baía do Espírito Santo pelo ADCP4. São apresentados dados de altura significativa (a), período de pico (b) e direção de pico (c) das ondas, além da velocidade (d) e direção das correntes (e) de superfície (azul), meio (verde) e fundo (vermelho); tensão de cisalhamento de Soulsby (f) e a intensidade e direção do vento (g) no mesmo período. Entre 25/02 e 11/03/2020 houve falha na coleta dos dados hidrodinâmicos, portanto há uma ausência de dados nesse período. Os retângulos verdes evidenciam a relação entre a chegada de frentes frias e a mudança no padrão de correntes e ondas na região de estudo.

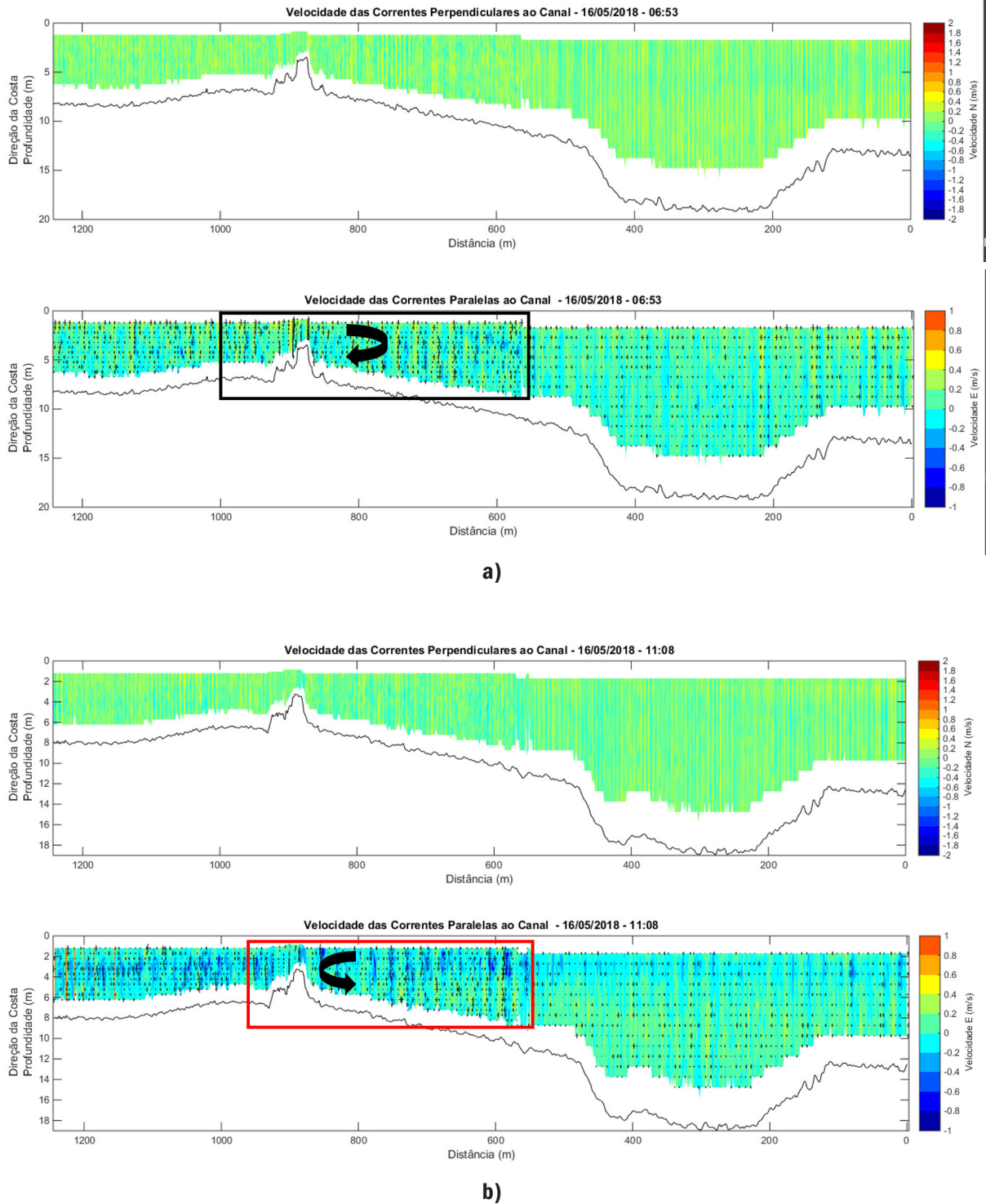


Figura 10. Perfis de velocidade das correntes perpendiculares e paralelas ao Canal de Acesso do Porto de Tubarão, durante as marés vazante (a) e enchente (b) do dia 16/05/2018. Retângulo preto indica área com maior intensidade das correntes e presença de vórtices. Já o retângulo vermelho apresenta área com circulação em duas camadas. Os valores positivos indicam correntes em direção do Canal de Acesso, enquanto valores negativos representam correntes direcionadas para o alto-fundo.

Outro fator responsável pela formação de regiões de acreção e erosão na área de navegação do Porto de Tubarão tem relação com a ação da propulsão dos navios próxima ao fundo, onde estão situadas as suas rotas principais no Canal de Acesso, região de manobras de atracação/desatracação na Bacia de Evolução e áreas dos Berços nos píeres de minério. Esta ação cria uma circulação local ressuspensando parte do sedimento depositado e transportando para áreas proximais com acúmulo de material no sopé dos taludes (Figura 11b). Portanto, essas regiões onde há a passagem e presença rotineira de navios tenderam a apresentar erosão do fundo entre julho de 2015 e abril de 2018.

A ocorrência de problemas oriundos da erosão e deposição do sedimento ressuspensado pela ação da propulsão dos navios em regiões portuárias vem sendo rotineiramente identificada na literatura (Chait, 1987; Hamill *et al.*, 1999; Mujal-Colilles *et al.*, 2017). O desenvolvimento da indústria naval nas últimas décadas com o aumento da capacidade de carga, dimensão dos navios e força das suas propulsões tem elevado a ocorrência de problemas estruturais e operacionais em portos de todo o mundo (Castells *et al.*, 2018). A magnitude dos processos de erosão e deposição decorrente da ação da propulsão também vem sendo atribuído ao aumento da frequência das manobras nos portos. Apesar de vários estudos terem sido realizados a partir de formulações criadas para reprodução da circulação gerada pela propulsão próximo ao fundo (PIANC, 2015), experimentos em laboratório (Chiew e Lim, 1996; Hong *et al.*, 2013) e modelos matemáticos (Mujal-Colilles *et al.*, 2018), geralmente as previsões obtidas ainda diferem muito dos resultados encontrados nos casos reais. Portanto, experimentos e análises de campo específicas para cada caso ainda são necessárias para melhor entender e prever a erosão e deposição decorrente da propulsão dos navios nos portos.

A não linearidade da taxa de assoreamento observada na área do Porto de Tubarão, quando se comparam o período entre julho de 2015 e abril de 2017 com o intervalo entre maio de 2017 a abril de 2018 (Tab. 2), foi controlada pela maior ou menor disponibilidade de sedimento em suspensão (MPS) na BES e pelas mudanças na dinâmica meteo-oceanográfica da área de estudo, assim como também evidenciado por Ezzeldin *et al.* (2019) para diversos portos no mundo.

A partir da análise histórica dos dados hidrodinâmicos, pode-se inferir que as principais fontes de sedimento inconsolidado para BES são oriundas da BV e da remobilização e transporte de material presente na plataforma continental adjacente

para dentro da baía. A tendência de exportação observada da BV para a BES, principalmente durante eventos de alta pluviosidade na região e aumento das vazões médias do rio Santa Maria da Vitória (Seção 4.1), deixa evidente o aporte de MPS na BES durante esses períodos. Como o sedimento superficial fino encontrado no canal do porto tende a não ser depositado e ficar em suspensão na região da BES (Seção 3.4), o seu transporte resultante está fortemente relacionado ao padrão hidrodinâmico atuante. Esse fato permite concluir que o aporte de MPS advindo da plataforma continental adjacente ocorre em todas condições hidrodinâmicas, com modificação das principais áreas fonte a partir dos padrões dominantes de corrente e onda (Figura 3). Entretanto, a ressuspensão e transporte de sedimentos mais grossos estão principalmente relacionados à atuação de ondas mais energéticas provenientes da chegada de frentes frias na região, oriundas de SE-S, com aumento da tensão de cisalhamento de fundo na BES (Figura 9f), assim como também observado por Neves *et al.* (2012) e Bastos *et al.* (2014).

Durante o período de análise do assoreamento no Porto de Tubarão (Seção 3.3), observa-se um período seco entre maio de 2015 a abril de 2017, quando houve uma média de pluviosidade de 928.9 mm/ano, enquanto entre maio de 2017 e abril de 2018 pode ser considerado um período chuvoso, com pluviosidade média de 1699.8 mm/ano, uma vez que a média histórica de pluviosidade da região é de 1300 mm/ano (INCAPER, 2020). Esse fato é corroborado pela menor média de vazão (4.9 m³/s) do rio Santa Maria da Vitória no mesmo período entre 2015 e 2017, quando comparado aos meses analisados entre 2017 e 2018 (11.3 m³/s). Portanto, a partir dos diferentes regimes hidrológicos ocorridos na região, associados ao seu respectivo padrão de circulação resultante (4.1), presume-se uma maior disponibilidade de MPS na BES entre 2017 e 2018, quando comparado ao período de 2015 a 2017.

Quando se analisa a incidência das ondas nos períodos de estudo do assoreamento no porto (Figura 12), observa-se uma significativa maior ocorrência de ondas de SE-S entre 2017 a 2018, associadas à chegada de frentes frias, quando comparado ao período entre 2015 a 2017. Portanto, entende-se que os padrões gerais de circulação na BES também foram diferentes entre os períodos dos levantamentos batimétricos realizados, assim como verificado pela análise dos dados hidrodinâmicos entre 2019 e 2020 (4.2).

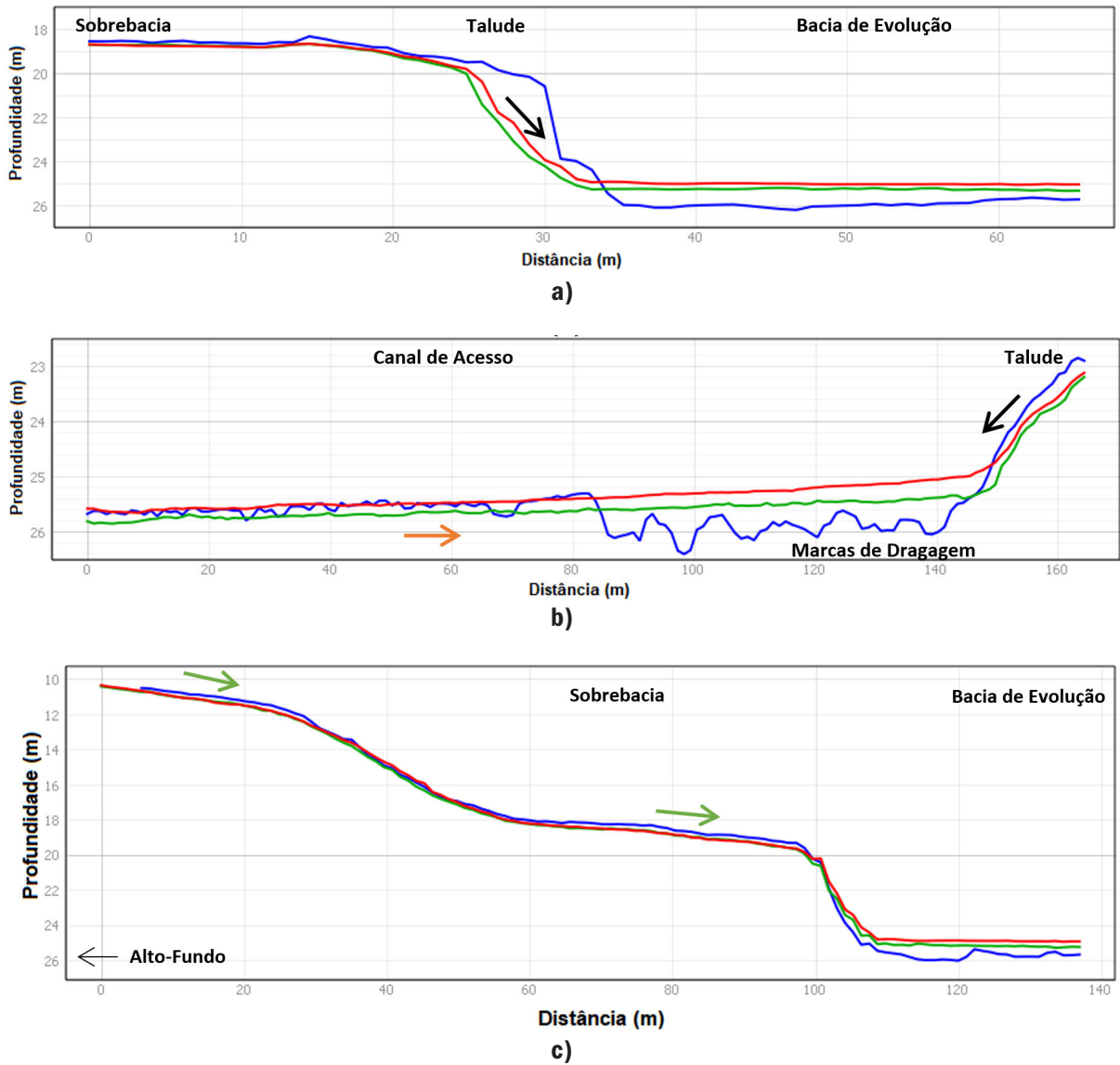


Figura 11. Perfis de profundidade traçados no talude entre a sobrebacia e Bacia de Evolução (a,c) e no talude do Canal de Acesso (b), conforme localizações apresentadas na Figura 6. A linha azul representa o levantamento realizado pós-dragagem em junho de 2015, enquanto as linhas verde e vermelha apresentam as profundidades em maio de 2017 e abril de 2018, respectivamente. As setas pretas indicam movimentos de massa nos taludes entre 2015 e 2018, enquanto a seta laranja indica a erosão do fundo pela atuação local da propulsão dos navios e o deslocamento do material para próximo do sopé dos taludes. As setas verdes indicam erosão das áreas mais rasas (fora do canal e sobrebacia) e transporte para dentro a porção norte da Bacia de Evolução.

Portanto, a maior ocorrência de ondas mais energéticas de SE-S levou ao estabelecimento de um padrão de circulação onde as correntes transversais, alinhadas à orientação da BES (NE-SO), passaram a ser mais constantes e influentes entre 2017 e 2018. Esse fato associado à maior disponibilidade de MPS na coluna d'água da BES pela exportação da BV, bem como a maior ressuspensão de sedimento da plataforma continental adjacente e da própria baía nesse período, tenderam a gerar um transporte resultante de sedimento para NE/E (Figura 13b). Consequentemente, isso levou ao aumento de transporte sedimentar em direção à região do canal do Porto de Tubarão entre 2017 e 2018, corroborando o maior assoreamento observado na área do porto nesse período. As correntes de fundo orientadas para dentro da bacia e sobrecaba, durante períodos de maré enchente e atuação de ondas de SE-S

(Figura 10b), também parecem erodir, ressuspender e transportar sedimento do leito marinho entre o alto-fundo e o início do talude para dentro do canal do porto.

Apesar do padrão de circulação característico da BES nos momentos de "tempo bom", com ondas na entrada da baía oriundas de E-SE, também promover transporte sedimentar da plataforma continental adjacente para dentro da BES e canal do porto (Figura 13a), há uma menor disponibilidade de MPS nesse período em decorrência do menor aporte da BV, menor ressuspensão do sedimento de fundo pela atuação de ondas menos energéticas e o impedimento de um efetivo transporte por correntes transversais da região interna da BES, geradas pela corrente longitudinal da praia de Camburi, para região do porto por conta do alto-fundo presente na área central da baía.

ADCP4 - Porto de Tubarão - Julho de 2015 a Abril de 2017

ADCP4 - Porto de Tubarão - Maio de 2017 a Abril de 2018

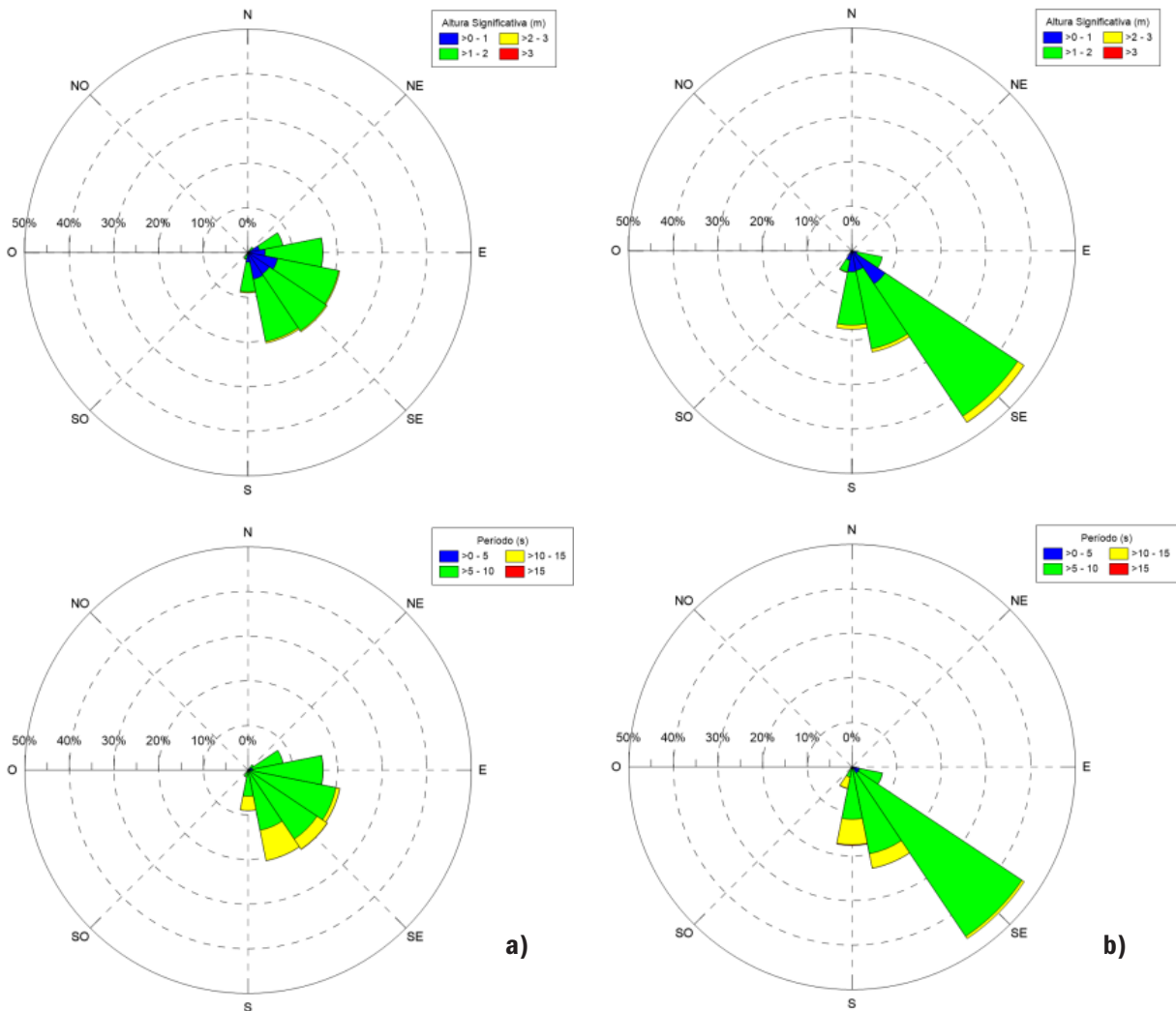


Figura 12. Padrão de altura significativa e período de pico das ondas observadas pelo ADCP4 localizado na entrada da BES entre (a) julho de 2015 a abril de 2017 e (b) maio de 2017 a abril de 2018.

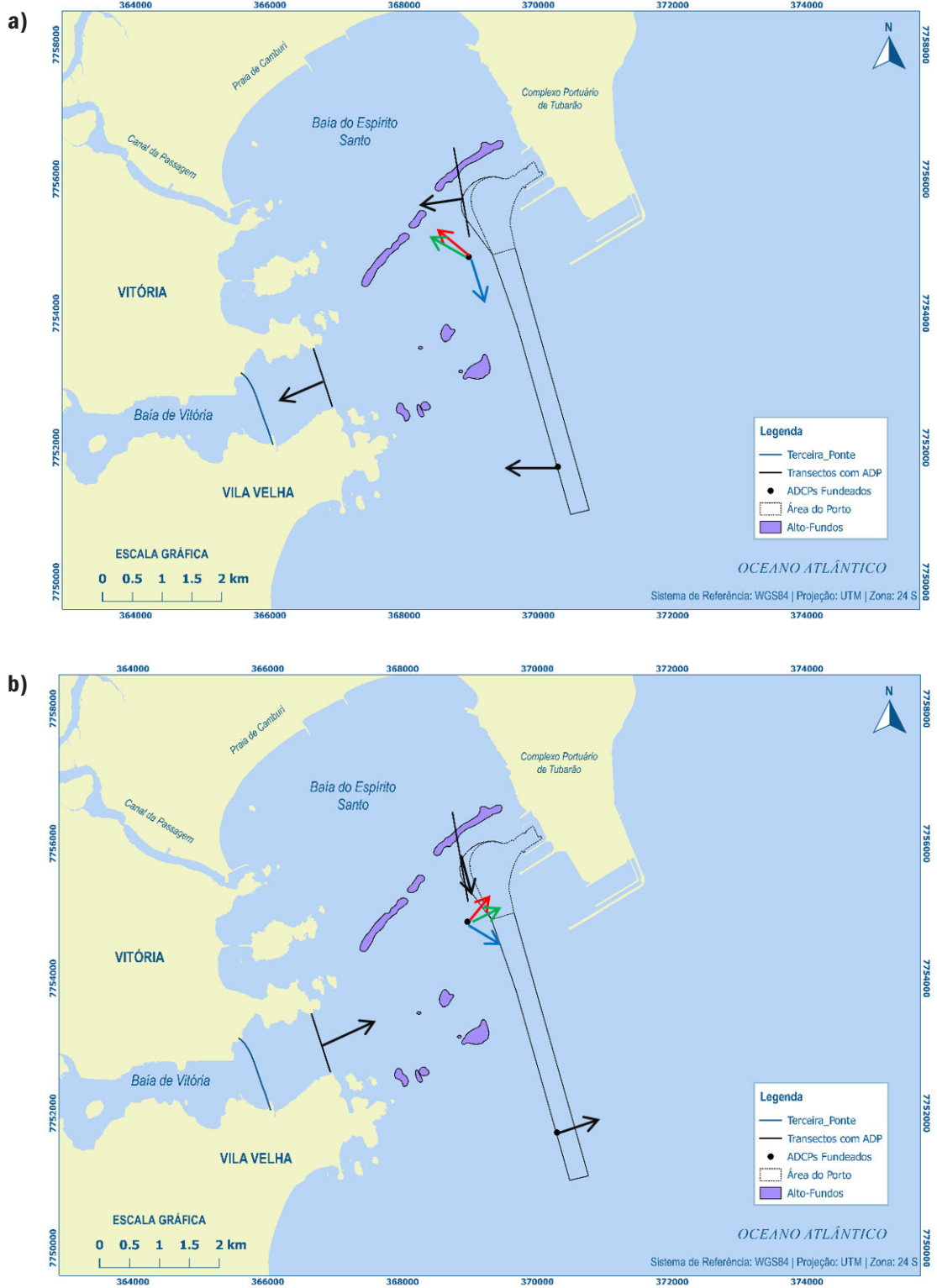


Figura 13. Circulação resultante na BES e BV em condições de onda de E-SE e baixa pluviosidade (a), e sob influência de ondas de SE-S e alta pluviosidade (b). As setas azuis, verdes, vermelhas e pretas indicam a direção resultante das correntes na superfície, meio, fundo e a partir da integração da coluna d'água.

5. CONCLUSÃO

A partir da análise integrada de dados pluviométricos, hidrológicos, hidrodinâmicos, batimétricos e sedimentares, coletados entre 2015 e 2020 na BES e adjacências, foi possível identificar os principais processos responsáveis pela variabilidade do assoreamento no Porto de Tubarão. Em decorrência da necessidade de realização de dragagens periódicas para manutenção das profundidades navegáveis do porto, o entendimento da influência meteo-oceanográfica na dinâmica sedimentar próxima a região do Porto de Tubarão se torna fundamental para a eficiente gestão das suas áreas marítimas (canal de navegação, bacia de evolução e berços).

Apesar da plataforma continental adjacente e porção interna da BES possuírem regiões com sedimento superficial fino e potencial de ressuspensão/transporte para dentro da área do Porto de Tubarão, o fluxo resultante da BV para a BES, observado principalmente durante os períodos chuvosos, foi identificado como a principal fonte de material sedimentar na região. Durante o período de baixa pluviosidade na região e consequente menor exportação de material sedimentar da BV, entre junho de 2015 e abril de 2017, houve uma menor taxa de assoreamento na área do porto (0,02 m/ano) decorrente do pequeno aporte de material sedimentar da região costeira adjacente. Além disso, a região do alto-fundo presente na região central da BES parece atuar como uma barreira para o transporte de sedimento próximo ao fundo da região interna para a porção central e externa da baía, a partir da análise dos dados hidrodinâmicos.

As mudanças no padrão de onda atuantes na BES também possuem grande influência na dinâmica sedimentar da região de estudo, uma vez que a circulação resultante da baía é alterada. O aumento da frequência de incidência de ondas de SE-S na BES foi observada simultaneamente à elevação da pluviosidade na região, levando ao aumento da exportação de sedimento da BV e o seu transporte preferencialmente para NE-E, como observado entre maio de 2017 e abril de 2018, quando foi verificada a maior taxa de assoreamento no Porto de Tubarão (0.35 m/ano).

Durante a incidência de ondas de SE-S, o domínio da atuação de correntes transversais na porção central da BES foi observado. A interação destas correntes com a morfologia de fundo gerou uma circulação em duas camadas, próximo ao alto-fundo, com aparente subsidência das correntes superficiais durante a maré enchente, direcionadas para dentro da baía (N-

NE). Isso proporcionou a formação de uma corrente no sentido contrário (S-SO) para dentro da Sobrebaía e Bacia de Evolução do porto na região mais profunda, a qual contribui com o transporte e deposição de sedimento na região norte da bacia. Além disso, os movimentos de massa observados durante a acomodação dos taludes, após a dragagem, e a circulação gerada pela atuação da propulsão dos navios próxima ao fundo nas suas principais rotas também foram importantes para a ocorrência de acreção ou erosão localmente.

Como sugestão para trabalhos futuros, há a necessidade de se aprofundar no entendimento de cada processo identificado como contribuinte para o assoreamento no Porto de Tubarão. Estudos com a utilização de dados históricos e oriundos de novos monitoramentos contínuos podem gerar uma correlação quantitativa entre a variação da pluviosidade, balanço sedimentar da BV e incidência de ondas de SE-S com a taxa de assoreamento no porto. Também é importante ampliar o entendimento da variabilidade da circulação da BES e a sua interação com o alto-fundo da porção central da BES, de modo a quantificar a sua contribuição para o assoreamento observado na porção norte da Bacia de Evolução do porto. Estudos mais aprofundados sobre a influência dos propulsores dos navios tipo do Porto de Tubarão na erosão e deposição identificada na área do porto, através da modelagem numérica calibrada com dados de campo, também são necessários para monitorar a formação de regiões de acúmulo de sedimento e manter a segurança da navegação.

Além disso, uma vez que a BV se apresenta como exportadora de sedimento para BES e Porto de Tubarão, principalmente nos períodos chuvosos, conclui-se que o direcionamento de esforços da iniciativa privada, junto com o poder público, para aplicação de ações mitigadoras de assoreamento da BV e dos seus rios afluentes, bem como melhoria da qualidade do sedimento presente nesses ambientes poderá impactar consideravelmente as taxas de assoreamento e qualidade do sedimento encontrado no Porto de Tubarão.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento da pesquisa através do edital FAPES/VALE/FAPERJ N° 01/2015 – Pelotização, Meio Ambiente e Logística.

REFERÊNCIAS

- Albino, J., Coelho, A. L. N., Girardi, G., Nascimento, K. A. (2018). Espírito Santo. In D. Muehe (Ed.), *Panorama da Erosão Costeira no Brasil* (pp. 433–477). Ministério de Meio Ambiente. https://www.researchgate.net/publication/329247970_Panorama_da_erosao_costeira_no_Brasil#:~:text=As%20taxas%20m%C3%A9dias%20de%20varia%C3%A7%C3%A3o,2%2C76%20m%2Fano
- Albino, J., Contti Neto, N. Oliveira, T. C. A. (2016). The beaches of Espírito Santo. In A. H. F. Klein and A. Short (Eds.), *Brazilian Beach Systems Book* (Springer, p. 611).
- Amarante, O. A. C., Silva, F. J. L., Andrade, P. E. P. (2009). *Atlas Eólico: Espírito Santo*. <https://arsp.es.gov.br/Media/arsi/Energia/Estudos%20Energéticos/2009/AtlasEolicoES.pdf>
- Amos, C. L., Sutherland, T. F., Radzjewski, B., Doucette, M. (1996). A rapid technique to determine bulk density of fine-grained sediments by X-ray computed tomography. *Journal of Sedimentary Research*, 66(5), 1023–1024. <https://doi.org/10.1306/D4268144-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- ANA (2011). *Guia nacional de coletas e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas*. <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sgc/CEDOC/Catalogo/2012/GuiaNacionalDeColeta.pdf>
- ATP (2019). *Relatório Anual 2019 - Análise do Setor e das Atividades*. <https://www.portosprivados.org.br/files/REALTORIO-ATIVIDADES-2019.pdf>
- Bastos, A. C., Costa, D. M., Carmo, D., Neto, J. A. B., Quaresma, V. S. (2014). Modern sedimentation processes in a wave-dominated coastal embayment: Espírito Santo Bay, southeast Brazil. *Geo-Marine Letters*, 35(1), 23–36. <https://doi.org/10.1007/s00367-014-0387-x>
- Brighetti, G., Martins, J. R. S. (2001). *Estabilização e Proteção de Margens*. http://www.pha.poli.usp.br/learq.aspx?id_arq=6592
- Câmara, G., Medeiros, J. S. (1998). *Geoprocessamento para projetos ambientais* (2nd ed.). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/Orosto.pdf
- Castells, M., Mujal-Colilles, A., Lull, T., Gironella, X., Martínez de Osés, F. X., Martín, A., Sánchez-Arcilla, A. (2018). Ship maneuver patterns to prevent propeller scouring effects. *PIANC-World Congress Panama City*, 15.
- Chiew, Y. M., Lim, S. Y. (1996). Local scour by a deeply submerged horizontal circular jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(9), 529–532. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:9\(529\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:9(529))
- Chait, S. (1987). Undermining of quay walls at South African ports due to the use of bow thrusters and other propeller units. *Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congress (PIANC)*, 58, 107–110.
- Costa, E. S., Grilo, C. F., Wolff, G. A., Thompson, A., Figueira, R. C. L., Sá, F., Neto, R. R. (2016). Geochemical records in sediments of a tropical estuary (Southeastern coast of Brazil). *Regional Studies in Marine Science*, 6, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.03.008>
- Defontaine, S., Sous, D., Morichon, D., Verney, R., Monperrus, M. (2019). Hydrodynamics and SPM transport in an engineered tidal estuary: The Adour river (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106445>
- Dias, J. A. (2004). *A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos: A curva granulométrica*. Universidade de Algarve. https://www.academia.edu/3170602/A_ANALISE_SEDIMENTAR_E_O_CONHECIMENTO_DOS_SISTEMAS_MARINHOS_Uma_Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_Oceanografia_Geol%C3%B3gica
- English, G., Hackston, D. (2013). *Environmental and Social Impacts of Marine Transport in the Great Lakes-St Lawrence Seaway Region: Executive Summary*. <https://greatlakes-seaway.com/wp-content/uploads/2019/10/Impacts-Comparison-ExSum.pdf>
- DHN (2017). *NORMAN 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos*. <https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAN-25-REV2.pdf>
- Dyer, K. R. (1995). Sediment Transport Processes in Coastal Environments. In PERILLO, G. M. E. (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries* (Elsevier, Vol. 53, pp. 423–449). [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0070-4571\(05\)80034-2](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0070-4571(05)80034-2)
- Ezzeldin, M. M., Rageh, O., Saad, M. E. (2019). *Navigation channel problems due to sedimentation* (p. 18). Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport. https://www.researchgate.net/profile/M_lb_Saad/publication/333812103_NAVIGATION_CHANNEL_PROBLEMS_DUE_TO_SEDIMENTATION/links/5d069e4a92851c900442cb25/NAVIGATION-CHANNEL-PROBLEMS-DUE-TO-SEDIMENTATION.pdf
- Fettweis, M., Baeye, M., Cardoso, C., Dujardin, A., Lauwaert, B., van den Eynde, D., van Hoestenbergh, T., Vanlede, J., van Poucke, L., Velez, C., Martens, C. (2016). The impact of disposal of fine-grained sediments from maintenance dredging works on SPM concentration and fluid mud in and outside the harbor of Zeebrugge. *Ocean Dynamics*, 66(11), 1497–1516. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0996-1>
- Garonce, F. A. A., Quaresma, V. S. (2014). Hydrodynamic aspects at Vitória Bay Mouth, ES. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 86(2), 555–570. <https://doi.org/10.1590/0001-37652014114012>
- Gnanadesikan, A., Weller, R. A. (1995). Structure and instability of the Ekman spiral in the presence of surface gravity waves. *Journal of Physical Oceanography*, 25(12), 3148–3171. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<3148:SAIOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<3148:SAIOTE>2.0.CO;2)

- Hamill, G. A., Johnston, H. T., Stewart, D. P. (1999). Propeller Wash Scour near Quay Walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(4), 170–175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1999\)125:4\(170\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:4(170))
- Hedges, J. I., Stern, J. H. (1984). Carbon and nitrogen determinations of carbonate containing solids. *Limnology and Oceanography*, 29(3), 657–663. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.3.0657>
- Hong, J. H., Chiew, Y. M., Cheng, N. S. (2013). Scour caused by a propeller jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(9), 1003–1012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000746](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000746)
- ICMBio. (2018). Atlas dos Manguezais do Brasil. In *Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade*. http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/manguezais/atlas_dos_manguezais_do_brasil.pdf
- INCAPER (2020). *Série Histórica Anual de Precipitação em Estação Meteorológica de Vitória/ES*. <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-vitoria>
- IPEA (2009). *Gargalos e Demandas da Infraestrutura Portuária e os Investimentos do PAC*. http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5821/1/NT_n02_Gargalos-demandas-infraestrutura-portuaria_Diset_2009-set.pdf
- Loureiro, D. V., Quaresma, V. S., Bastos, A. C. (2013). Estudo de Caso da Dragagem do Porto de Tubarão (Vitória-ES): Utilização Integrada de Dados Geofísicos e Geotécnicos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 91, 24–25.
- Martins, G. J., Marone, E., Angulo, R. J., Noernberg, M. A., de Quadros, C. J. L. (2004). Dinâmica Da Zona De Rasa De Shoaling E O Transporte De Sedimentos Na Desembocadura Sul Do Complexo Estuarino De Paranaguá – PR. *Boletim Paranaense de Geociências*, 54, 51–64. <https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/viewFile/4252/3432>
- Mathew, R., Winterwerp, J. C. (2020). Sediment dynamics and transport regimes in a narrow microtidal estuary. *Ocean Dynamics*, 70(4), 435–462. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01345-9>
- Meade, R. H. (1969). Landward Transport of Bottom Sediments in Estuaries of the Atlantic Coastal Plain. In *SEPM Journal of Sedimentary Research*: Vol. Vol. 39. <https://doi.org/10.1306/74d71c1c-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Melo, E., Gonzalez, J. A. (1995). Coastal Erosion at Camburi Beach (Vitoria, Brazil) and its Possible Relation to Port Works. *Proceedings of IV International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries - COPEDEC*, 397–411.
- Mujal-Colilles, A., Gironella, X., Sanchez-Arcilla, A., Puig Polo, C., Garcia-Leon, M. (2017). Erosion caused by propeller jets in a low energy harbour basin. *Journal of Hydraulic Research*, 55(1), 121–128. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1252801>
- Mujal-Colilles, A., la Castells, M., Llull, T., Gironella, X., de Osés, X. M. (2018). Stern twin-propeller effects on harbor infrastructures. Experimental analysis. *Water (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111571>
- Neves, R. C., Quaresma, V. S., Bastos, A. C., da Silva, J. C. R. (2012). Sedimentary transport in coastal bays: Case study of Vitória and Espírito Santo Bays - ES - Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 30(2). <https://doi.org/10.22564/rbfg.v30i2.106>
- Nichols, M. M., Biggs, R. B. (1985). Estuaries. In R. A. Davies (Ed.), *Coastal sedimentary environments* (pp. 77–186). Springer-Verlag.
- Paphitis, D., Collins, M. B. (2005). Sediment resuspension events within the (microtidal) coastal waters of Thermaikos Gulf, northern Greece. *Continental Shelf Research*, 25(19–20), 2350–2365. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.08.028>
- Parente, C. E., Nogueira, I. C. M., Martins, R. P., Ribeiro, E. O. (2015). Climatologia De Ondas. In *Meteorologia e Oceanografia*. Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/b978-85-352-6208-7.50009-x>
- Pereira, M. D., Siegle, E., Miranda, L. B. de, Schettini, C. A. F. (2010). Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas (BA). *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(3), 427–444. <https://doi.org/10.1590/s0102-261x2010000300008>
- PIANC (2015). *Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships*. Report N° 180. https://www.researchgate.net/publication/318761768_Guidelines_for_protecting_berthing_structures_from_scour_caused_by_ships
- Pianca, C., Mazzini, P. L. F., Siegle, E. (2010). Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1), 53–70. <https://doi.org/10.1590/s1679-87592010000100006>
- Richman, J. G., de Szoeko, R. A., Davis, R. E. (1987). Measurements of near-surface shear in the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 92(C3), 2851. <https://doi.org/10.1029/JC092iC03p02851>
- Santos, J. M., Reis, N. C., Galvão, E. S., Silveira, A., Goulart, E. V., Lima, A. T. (2017). Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(27), 22026–22039. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9677-y>
- Schettini, C. A. F., Truccolo, E. C. (2009). Circulação do baixo estuário do Rio Itajaí. In J. O. Branco, Lunardon-Branco, M. J.; Bellotto, V. R. (Eds.), *Estuário do Rio Itajaí-Açú, Santa Catarina: caracterização ambiental e alterações antrópicas* (pp. 13–26). UNIVALI.
- SOMA, S. M. A. (2003). *EIA - Estudo de impacto ambiental de pequena central hidrelétrica Timbuí Seco: rio Santa Maria da Vitória, Espírito Santo*. (p. 81). Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA).

- Soulsby, R. L. (1995). Bed shear-stresses due to combined waves and currents. In M. J. F. Stive, H. J. de Vriend, J. Fredse, L. Hamm, R. L. Soulsby, C. Teisson, and J. C. Winterwerp (Eds.), *Advances in Coastal Morphodynamics: An Overview of the G-8 Coastal Morphodynamics Project* (pp. 420-423). Delft Hydraulics.
- Taki, K. (2001). Critical shear stress for cohesive sediment transport. In W. H. McAnally and A. J. Mehta (Eds.), *Proceedings in Marine Science: Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes* (3rd ed.). Elsevier.
- Theodoro, S. H. (2005). *Mediação de conflitos socioambientais*. Garmond. 220p.
- Valle-Levinson, A., Gutierrez De Velasco, G., Trasviña, A., Souza, A. J., Durazo, R., and Mehta, A. J. (2009). Residual exchange flows in subtropical estuaries. *Estuaries and Coasts*, 32(1), 54-67. <https://doi.org/10.1007/s12237-008-9112-1>
- van Rijn, L. C. (2016). *Harbour siltation and control measures*. Online. <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Harboursiltation2012.pdf>
- van Rijn, L. C. (2018). *Channel slopes of mud, silt and sand*. Online. <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Channelslopesbrief2018.pdf>
- WEF (2020). *The Global Competitiveness Report - Special Edition 2020*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2020.pdf

PROVENIÊNCIA DOS SEDIMENTOS FINOS PARA O PORTO DE TUBARÃO, BRASIL

Rafael Carvalho Neves^{@ 1}, Valéria da Silva Quaresma^{1,2}, Alex Cardoso Bastos^{1,3}

RESUMO: Em decorrência da importância das vias navegáveis e portos brasileiros para o comércio exterior do país, além da crescente demanda por melhoria da infraestrutura portuária para aumento da competitividade do Brasil perante o mundo, o presente artigo tem como objetivo principal avaliar o processo de assoreamento no Porto de Tubarão, Vitória-ES (Brasil). Por realizar dragagens de manutenção periódicas para manter a sua área marítima navegável, esse porto necessita de um aprimoramento no entendimento da dinâmica sedimentar da região, de modo a fornecer embasamento científico para discussões como planejamento de obras de dragagem e segurança da navegação. Os resultados sedimentológicos e geoquímicos das 91 amostras de sedimento superficial coletadas na Baía do Espírito Santo (BES) e adjacências passaram por análises de agrupamento de observações (*cluster analysis*) com separação das amostras em 4 grupos estatisticamente diferentes. Os elevados teores de matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e isótopo estável de nitrogênio ($\delta^{15}N$) e razão C/N observados em grande parte da Baía de Vitória (BV) e Canal da Passagem (CP) sugerem o predomínio de sedimento terrígeno altamente antropizado na região. Na BES, grande parte do sedimento encontrado na porção interna da baía perto da Praia de Camburi fica restrita nessa região devido atuação do alto-fundo, presente na porção central da BES, como um obstáculo para a efetiva troca de sedimento entre as áreas mais interna e externa da baía. Na porção central e externa da BES, há uma clara mistura entre o sedimento terrígeno, oriundo da BV, e marinho. Os elevados valores de COT e NT presentes no sedimento lamoso dentro do canal do Porto de Tubarão também sugerem a contribuição da MO e material fino advinda da BV no canal do porto. Os resultados e as discussões apresentadas nesse estudo evidenciam a importância do monitoramento contínuo dos parâmetros meteorocinográficos e de qualidade do sedimento como base para o entendimento da complexa dinâmica sedimentar observada nas regiões portuárias.

Palavras-chave: sedimentologia, geoquímica, isótopos, agrupamento de observações, portos.

ABSTRACT: The importance of Brazilian waterways and ports for the country's foreign trade and the growing demand for improving port infrastructure to increase Brazil's competitiveness in the world inspired the main objective of this study to evaluate the siltation process in the port of Tubarão, Vitória-ES (Brazil). Due periodic maintenance dredging necessity to keep the maritime area navigable, improving the understanding of sediment dynamics in area of the Tubarão Port is imperative, to provide a scientific basis for discussions, such as dredging projects planning and navigation safety. The sedimentological and geochemical results of the 91 superficial sediment samples collected at Espírito Santo Bay (BES) and in the surrounding areas were analyzed by Cluster Analysis with distribution the samples into 4 statistically different groups. The high levels of organic matter (MO), total organic carbon (COT), total nitrogen (NT) and nitrogen stable isotope ($\delta^{15}N$), such as high carbon to nitrogen (C/N) ratio observed in all Vitória Bay (BV) and Passagem Channel (CP) areas suggest the anthropized terrestrial sediment predominance in this region. At BES, the sediment found in the inner part near Camburi beach is trapped in this region due the action of rock outcrop, present in the central region, as an obstacle to sediment effective exchange between the innermost and outside bay areas. In central and external areas of BES, there is a mix between marine and terrestrial sediment from BV. The higher levels of COT and NT found in the sediments inside the port channel also indicate the contribution of MO and fine sediments from BV to the Tubarão Port area. The results and discussions presented in this study demonstrate the importance of continuous monitoring of meteo-oceanographic and sediment quality as a basis for understanding the complex sediment dynamics in port regions

Keywords: sedimentology, geochemistry, isotopes, cluster analysis, ports.

@ Corresponding author: rcneves@outlook.com.br

1 Universidade Federal do Espírito Santo

2 Email: vdsquaresma@gmail.com

3 Email: alexcardosobastos@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O assoreamento das áreas portuárias instaladas em regiões fluviais e costeiras é um fenômeno comum e está intimamente relacionado com as condições ambientais e físicas da água, além da própria configuração geométrica do porto (van Rijn, 2016). Além disso, o crescente tamanho dos navios e o aumento das restrições da legislação ambiental, quanto à retirada do sedimento colmatado, tem tornado a manutenção das profundidades de navegação seguras dos portos um desafio. A busca por novas soluções viáveis de manipulação da dinâmica sedimentar têm sido constante na comunidade internacional (Kirby, 2011). No entanto, como é comum a carência de conhecimento sobre as especificidades locais da dinâmica dos sedimentos, grande parte dos portos não realiza uma gestão efetiva do assoreamento.

As áreas dragadas e geralmente protegidas para as atividades portuárias se tornam regiões sem equilíbrio hidrodinâmico e como consequência, há um rápido acúmulo de sedimento fino após a sua retirada (Fettweis *et al.*, 2016). Os potenciais impactos negativos do descarte desse material dragado são bem conhecidos quanto à dispersão de poluentes (Agunwamba *et al.*, 2012), alteração nas comunidades bentônicas e pelágicas (Smith e Rule, 2001; Stronkhorst *et al.*, 2003; Simonini *et al.*, 2005), aumento da turbidez (Orpin *et al.*, 2004; Fettweis *et al.*, 2011) e mudanças na profundidade e hidrodinâmica local (Four e Lancker, 2008; Okada, *et al.*, 2009; Stockmann *et al.*, 2009).

A correlação entre as características sedimentológicas do sedimento superficial de fundo com a sua tendência de transporte e deposição tem sido amplo objeto de estudo (Mclaren, 1981; Mclaren e Bowles, 1985; Gao e Collins, 1992; Le Roux, 1994; Yamashita *et al.*, 2011). Como a matéria orgânica pode ser retida em grandes quantidades no sedimento superficial de ambientes aquáticos (Burone *et al.*, 2003; Buruaem *et al.*, 2012; Hossain *et al.*, 2014), estudos geoquímicos do sedimento de fundo também têm sido considerados efetivos para a determinação da dinâmica da matéria orgânica e avaliação da qualidade de ecossistemas aquáticos (Fry *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2006; Rumolo *et al.*, 2011; Di Leonardo *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2012), além de contribuir para distinção entre origens autóctone e alóctone do material depositado (Silliman *et al.*, 1996).

O Porto de Tubarão, localizado em Vitória, estado do Espírito Santo, é um dos principais portos exportadores do Brasil e possui uma área de navegação com profundidades mantidas

a partir de dragagens de manutenção rotineiras. A presença de sedimento fino e lama fluida dentro da área do porto é comum e foi bem caracterizada por Quaresma *et al.* (2011) e Bastos *et al.* (2014) por esta razão o mapeamento e a caracterização destes depósitos se tornam cada vez mais importantes para a manutenção da navegabilidade destas áreas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi de demonstrar a aplicação de métodos acústicos de investigação geofísica na identificação da ocorrência de lamas fluidas e seu mapeamento. Para tanto, foram realizados levantamentos sísmicos, batimétricos, sonográficos e coleta de testemunhos para determinação da sua densidade. Estes levantamentos foram realizados na área do Porto de Tubarão (Espírito Santo). Por estar situado em uma área de baía semi-exposta a fatores meteocanográficos (Albino *et al.*, 2018), próximo a regiões de considerável aporte fluvial impactado pela urbanização (Lehrback *et al.*, 2016) e adjacente a depósitos de material fino na plataforma continental (Vieira *et al.*, 2019), o entendimento da dinâmica responsável pelo assoreamento no Porto de Tubarão é complexo e requer uma análise holística do comportamento da área de estudo.

Sob a ótica da análise do sedimento superficial presente na área navegável do Porto de Tubarão e no seu entorno, esse estudo tem o objetivo de fornecer subsídios para o entendimento dos processos sedimentares responsáveis pelo aporte de sedimento inconsolidado no porto, bem como determinação da sua proveniência. Para tanto, análises sedimentológicas do sedimento de fundo e geoquímicas da matéria orgânica presente neste foram realizadas, sendo avaliadas as características granulométricas, densidade superficial, teor de matéria orgânica total (MOT) e teor de carbonato de cálcio (CaCO_3), além das concentrações de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O Porto de Tubarão é um dos maiores portos do Brasil em termos de comercialização de carga e está situado na Baía do Espírito Santo (BES) (Figura 1). Essa região está interligada com a Baía de Vitória (BV), onde se encontra instalado o Porto de Vitória e uma das maiores áreas de manguezal em área urbana do Brasil com 18 km² (ICMBIO, 2018).

A região de estudo apresenta micromaré (amplitudes < 1,7m) (DHN, 2022) e pluviosidade média de 1.350 mm/ano, com

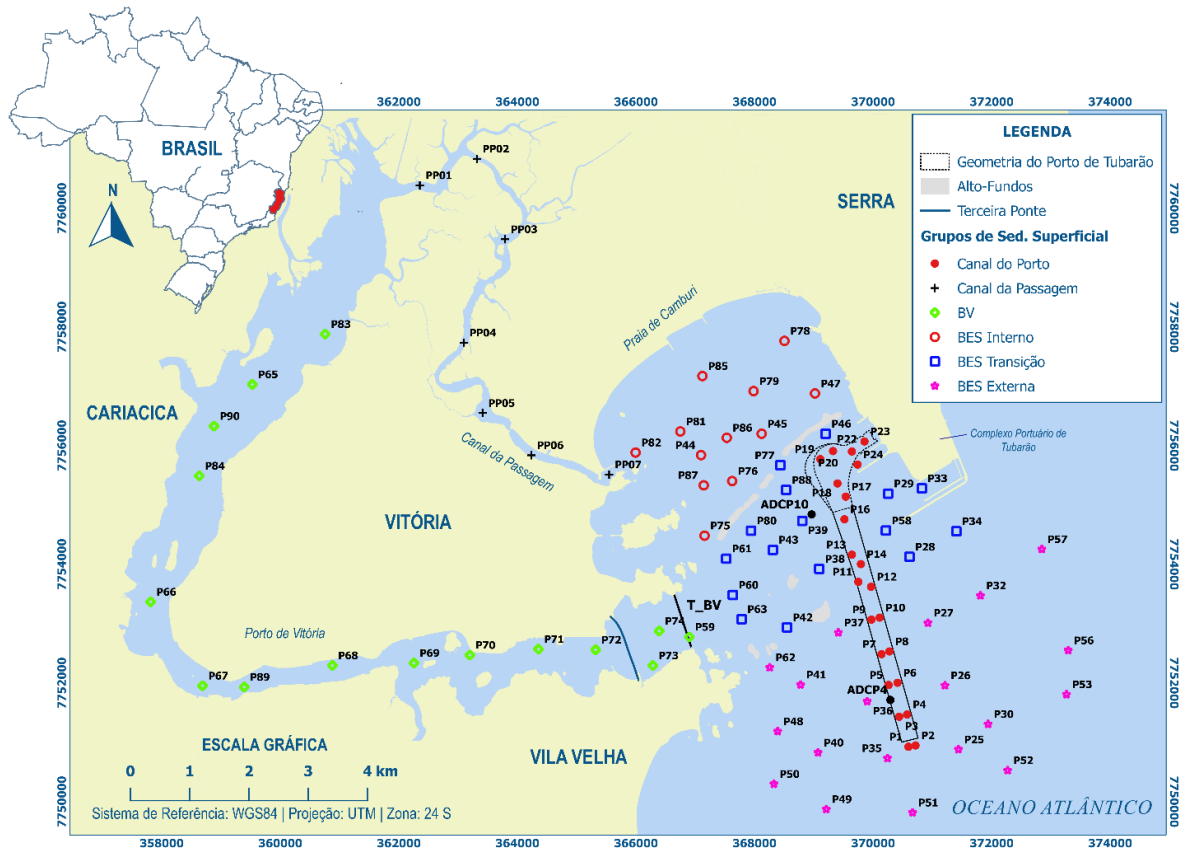


Figura 1. Localização das amostras de sedimento superficial identificadas por grupo de análise, formados a partir da região de coleta de cada amostra.

meses de verão mais chuvosos e meses de inverno mais secos (INCAPER, 2020). O rio Santa Maria da Vitória (SMVT) é o principal afluente da BV e possui vazão natural média aproximada de 10,7 m³/s (SOMA, 2003). Os ventos de leste (E) e nordeste (NE) são predominantes na região, com a passagem de frentes polares e ventos de sul (S) - sudeste (SE) mais frequentes no verão e primavera (Amarante *et al.*, 2009).

Por se situar numa área altamente urbanizada e industrializada com grandes deficiências no controle e tratamento sanitário/ambiental, a BES e BV são impactadas fortemente por descarga direta de esgoto doméstico, lixiviamento de resíduos sólidos, efluentes industriais e poluição atmosférica (Santos *et al.*, 2017).

2.2 Coleta e análises sedimentares

No total, 91 amostras de sedimento superficial foram coletadas com draga tipo Van Veen entre 28/02/2018 e 15/10/2019 (Figura 1). A coleta e armazenamento das amostras seguiram

as diretrizes apresentadas pelo Guia Nacional de Coleta de Amostras (ANA, 2011).

A granulometria das frações mais grossas (cascalho e areia) foi determinada por peneiramento a seco (0,5 em 0,5 phi) e a fração lama foi levada ao granulômetro a laser (Mastersizer 2000 da Malvern). O cálculo dos parâmetros estatísticos foi realizado no software GRADISTAT, versão 9.1, e a classificação granulométrica foi aplicada com base em Dias (2004). O teor de carbonato de cálcio (CaCO₃) foi obtido a partir da sua queima com ácido clorídrico (HCl), diluído a 10%. Os teores de matéria orgânica (MO) foram determinados pela sua queima em mufla a 550 °C por 4 horas. Já a densidade e o teor de água das amostras com fração lamosa foram determinados de acordo com Amos *et al.* (1996).

2.3 Técnicas analíticas da geoquímica

Após passar pela liofilização e retirada do CaCO₃ pela queima com HCl diluído a 10%, a análise elementar para obtenção do

COT e NT nas amostras de sedimento foi realizada pelo método de combustão a seco (Hedges e Stern, 1984). A análise dos isótopos estáveis de carbono e nitrogênio também seguiu a mesma preparação das amostras, sendo posteriormente inseridas em cápsulas de estanho no Espectrômetro de Massa de Razão Isotópica (Delta V Plus), acoplado ao EA 1112. Três corridas com cápsulas de estanho vazias foram realizadas para corrigir o efeito do C e N associado às cápsulas, seguidas pela calibração do aparelho em triplicata com o padrão certificado IAEA USGS40, sendo aceito um desvio menor que $\pm 0,5\%$. Os resultados dos isótopos estáveis foram reportados em delta (‰).

2.4 Análise dos dados sedimentares e geoquímicos

Inicialmente, a correlação não paramétrica de Spearman foi utilizada para identificar as correlações entre os parâmetros sedimentológicos e geoquímicos analisados nas amostras. Posteriormente, a análise multivariada de *Cluster Analysis* foi aplicada com valores das variáveis padronizadas, a partir do método de ligação de Ward e a medida de distância Euclidiana, para obtenção da similaridade entre as amostras coletadas. Por fim, os grupos identificados passaram por uma análise multivariada da variância (MANOVA) para comprovar estatisticamente a diferença dos parâmetros entre os agrupamentos formados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros sedimentológicos e marcadores geoquímicos

Os resultados detalhados de todos os parâmetros sedimentológicos e geoquímicos analisados no sedimento superficial são apresentados na Tabela 1 do SI-I.

A densidade superficial das amostras de sedimento variou entre 601 kg/m^3 a 1.651 kg/m^3 ($n=65$, $mediana = 1.031 \pm 185 \text{ kg/m}^3$). O teor de lama variou consideravelmente entre 99,8% e 0,1% ($n=91$, $mediana = 40 \pm 40\%$) em toda a área de estudo. O teor de MO oscilou entre 0,3% e 30,5% ($n=91$, $mediana = 3,8 \pm 5,6\%$), com teores maiores que 15% observados em áreas próximas de aporte de esgoto na BV e CP. As amostras de sedimento superficial apresentaram variação entre 0,5% e 60% ($n=91$, $mediana = 19 \pm 14,1\%$) para teor de CaCO_3 , com maiores teores encontrados na área externa da BES, região norte da Praia de Camburi próxima ao Porto de Tubarão e associado a regiões com grande presença de bivalves no sedimento da BV.

Os valores de COT variaram entre 0,03% e 10,5% ($n=91$, $mediana = 1,3 \pm 1,8\%$), enquanto as porcentagens de NT

oscilaram entre 0,01% e 0,81% ($n=91$, $mediana = 0,15 \pm 0,16\%$). O limite de detecção do COT e do NT foram de 0,03% e 0,01%, respectivamente. O desvio padrão para as análises das amostras em duplicata foi de $\pm 0,008\%$ para NT e $\pm 0,091\%$ para COT. A razão C/N observada na área de estudo variou entre 2,3 e 137. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ variaram entre $-28,4\%$ e $-1,8\%$ ($n=91$, $mediana = 23,67 \pm 2,9\%$), enquanto os sinais de $\delta^{15}\text{N}$ oscilaram entre $0,2\%$ e $20,6\%$ ($n=91$, $mediana = 4,8 \pm 4,4\%$). O desvio padrão para as análises isotópicas em duplicata foram de $0,14\%$ para $\delta^{13}\text{C}$ e $0,31\%$ para $\delta^{15}\text{N}$. Os maiores valores do isótopo estável de nitrogênio foram encontrados em algumas regiões da BV e área interna da BES.

3.2 Caracterização do sedimento superficial

A distribuição do sedimento superficial na BV e BES seguiu o mesmo padrão encontrado por Veronez Júnior *et al.* (2009) e Bastos *et al.* (2014). Os sedimentos finos observados no canal do Porto de Tubarão estão associados a sua maior profundidade, em relação ao seu redor, e tendência natural de assoreamento dessa região (Quaresma *et al.*, 2011). A região NE da Praia de Camburi é uma área abrigada com hidrodinâmica menos energética e deposição de sedimento fino associado à corrente longitudinal resultante da praia (Albino *et al.*, 2016). Já a lama observada à SO da área externa da BES tem maior teor de CaCO_3 e origem a partir do retrabalhamento e transporte dos biodetritos encontrados na plataforma continental adjacente (Vieira *et al.*, 2019). Na BV e CP, a presença predominante de lama está correlacionada com o aporte terrígeno de sedimento fino, principalmente próximo à desembocadura dos rios, e floculação proporcionada pelo despejo de esgoto em áreas mais urbanizadas.

As regiões próximas aos bairros Ilha das Caieiras, Maria Ortiz e Santa Martha do município de Vitória apresentaram os maiores teores de MO ($> 30\%$) em decorrência da proximidade de áreas de conhecido aporte de esgoto (Jesus *et al.*, 2004). Altos teores de MO ($> 15\%$) também foram observados na região do Porto de Vitória, próximo ao cais dos pescadores no bairro da Enseada do Suá, desembocadura do rio Bubu e do canal da Costa, embaixo da Terceira Ponte, e também estão associados à chegada de esgoto nessas áreas. Na BES, os teores mais altos de MO tiveram forte correlação positiva com os teores de lama, como observado por Burone *et al.* (2003) e Lee *et al.* (2019) em áreas costeiras urbanizadas.

A baixa porcentagem de amostras com razão C/N maiores que 15 (14%) evidencia a grande contribuição da região marinha na composição do sedimento superficial da área de estudo

(Bordovskiy, 1965; Meyers, 1997). Os valores típicos de origem marinha estão entre 4 e 12, enquanto a matéria orgânica de origem terrestre apresenta uma razão igual ou superior a 20. Essa distinção entre os rácios é função da ausência de celulose, característica de plantas vasculares terrestres ricas em carbono, em algas planctônicas e enriquecimento de proteína, abundante em nitrogênio, na sua composição. Os maiores valores de razão C/N foram encontrados na região da BV, CP e próximo à Praia de Camburi associados aos aportes continentais de rios, águas pluviais contaminadas e esgoto.

O carbono orgânico total e o nitrogênio total estão positivamente correlacionados ($n = 91$, $r^2 = 0,8599$, $p < 0,001$) e a interseção da linha da correlação calculada é próxima à zero (Figura 2). Portanto, pode-se assumir que o NT calculado representa uma estimativa próxima do nitrogênio orgânico e a razão C/N calculada se aproxima da razão COT/nitrogênio orgânico (Andrews *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2006), excluindo a possibilidade de um significativo controle da granulometria do sedimento superficial na distribuição de nitrogênio observado na área de estudo. A correlação apresentada entre os valores de D50 e razão C/N no presente estudo também foi baixa (-0,219), reforçando essa conclusão. A moderada (>1%) a alta (>3,5%) presença de COT observada em mais de 58% das amostras

analisadas, correlacionada positivamente com NT, sugere a ocorrência de impactos consideráveis na riqueza de espécies da comunidade bentônica da região (Hyland *et al.*, 2005).

A correlação entre os valores de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio entre si e com a razão C/N são muito utilizados na literatura como indicadores da origem da MO presente nos sedimentos (Meyers, 1997; Lamb *et al.*, 2006). As variações do $\delta^{13}\text{C}$ no sedimento estão fortemente relacionadas com a utilização do bicarbonato (HCO_3^-) e CO_2 dissolvido na produção primária (Benedict *et al.*, 1980). Como a relação entre CO_2 dissolvido e HCO_3^- é uma função do pH do ambiente, existe menos CO_2 disponível em águas marinhas, o qual é preferencialmente utilizado pelo fitoplâncton e possui menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ na sua composição (-8‰ em equilíbrio com a atmosfera), quando comparado aos valores encontrados na composição do HCO_3^- (~0‰) (Keeley e Sandquist, 1992). Portanto, o plâncton marinho terá maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ na sua composição, uma vez que necessitará consumir predominantemente HCO_3^- .

Parte das regiões mais internas da BV e CP apresentaram valores de $\delta^{13}\text{C}$, entre -30‰ e -24‰, e razão C/N acima de 12 (PP01, P65, P90 e P66) característicos de MO com origem de plantas terrestres (C3) e fluviais (Deines, 1980; Prah *et al.*,

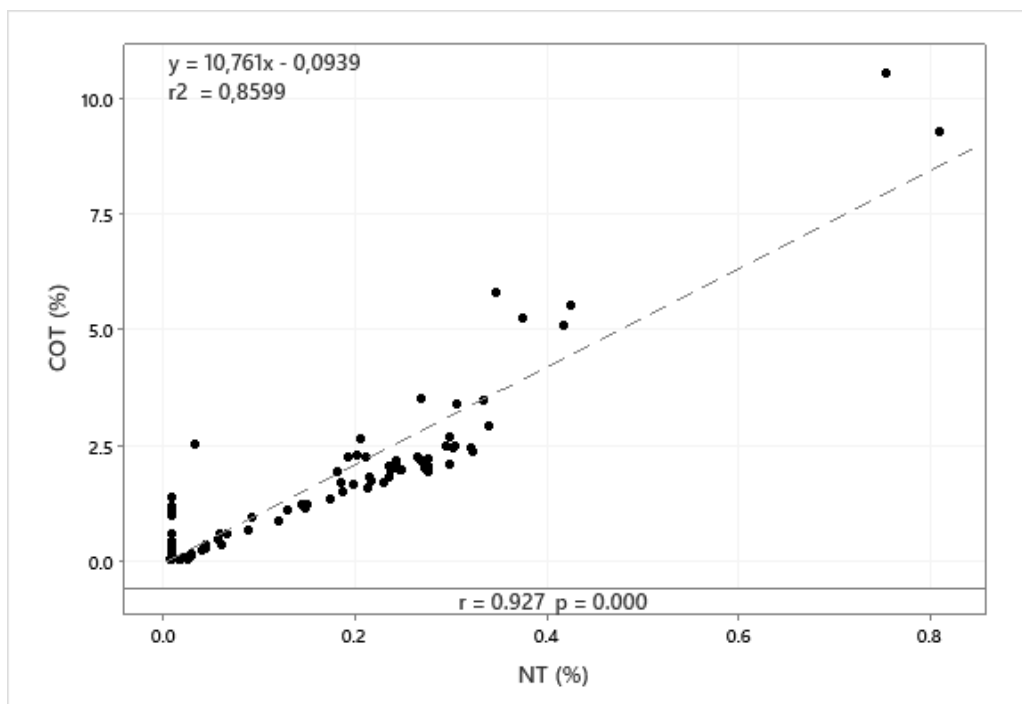


Figura 2. Correlação entre o COT e NT encontrado no sedimento superficial da região da BES, BV e CP.

1980). Com a aproximação da desembocadura, as amostras tenderam a apresentar um aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e uma diminuição dos valores de razão C/N (P59, P69 e PP07), devido a maior influência marinha na MO do sedimento superficial (Fig. 3). Algumas amostras coletadas na região interna da BES, próxima à Praia de Camburi, também apresentaram sinais característicos de contribuição terrestre para o sedimento superficial com elevados valores de razão C/N (P78, P86 e P87). Entretanto, o aumento da presença de $\delta^{13}\text{C}$ na composição da MO evidencia a maior contribuição marinha nessa região. Os valores discrepantes de razão C/N (>60) encontrados na proximidade da Ilha da Fumaça (P70), saída do Canal da Costa (P73), bairro Santo Antônio (P84), proximidade do fundeadouro de navios (P48) e CP (PP04 e PP06), associados a valores mais baixos de $\delta^{13}\text{C}$ (< -25‰), sugerem a contaminação por hidrocarbonetos nessas regiões (Ghazali *et al.*, 2004; Rumolo

et al., 2011) em função da liberação de óleo em atividades ligadas a embarcações comumente presente nessas áreas e/ou escoamento de águas pluviais contaminadas.

As amostras coletadas na região de transição da BES apresentaram valores de razão C/N entre 4 e 11 e isótopos estáveis de carbono variando entre -28‰ e -22‰ (Figura 3). Esse facto comprova a contribuição mista da MO presente no sedimento superficial dessa região, com aporte de carbono orgânico particulado e dissolvido de origem planctônica marinha e também oriundo da mistura entre plâncton fluvial e matéria orgânica terrestre (Peterson *et al.*, 1994; Middelburg e Nieuwenhuize, 1998; Yamaguchi *et al.*, 2003). Os baixos valores de razão C/N (< 4) e variação de entre -27‰ e -24‰ observados próximos à desembocadura da BV, a sudoeste da BES, podem estar relacionados com a grande presença de bactérias decompositoras na região, em decorrência da chegada

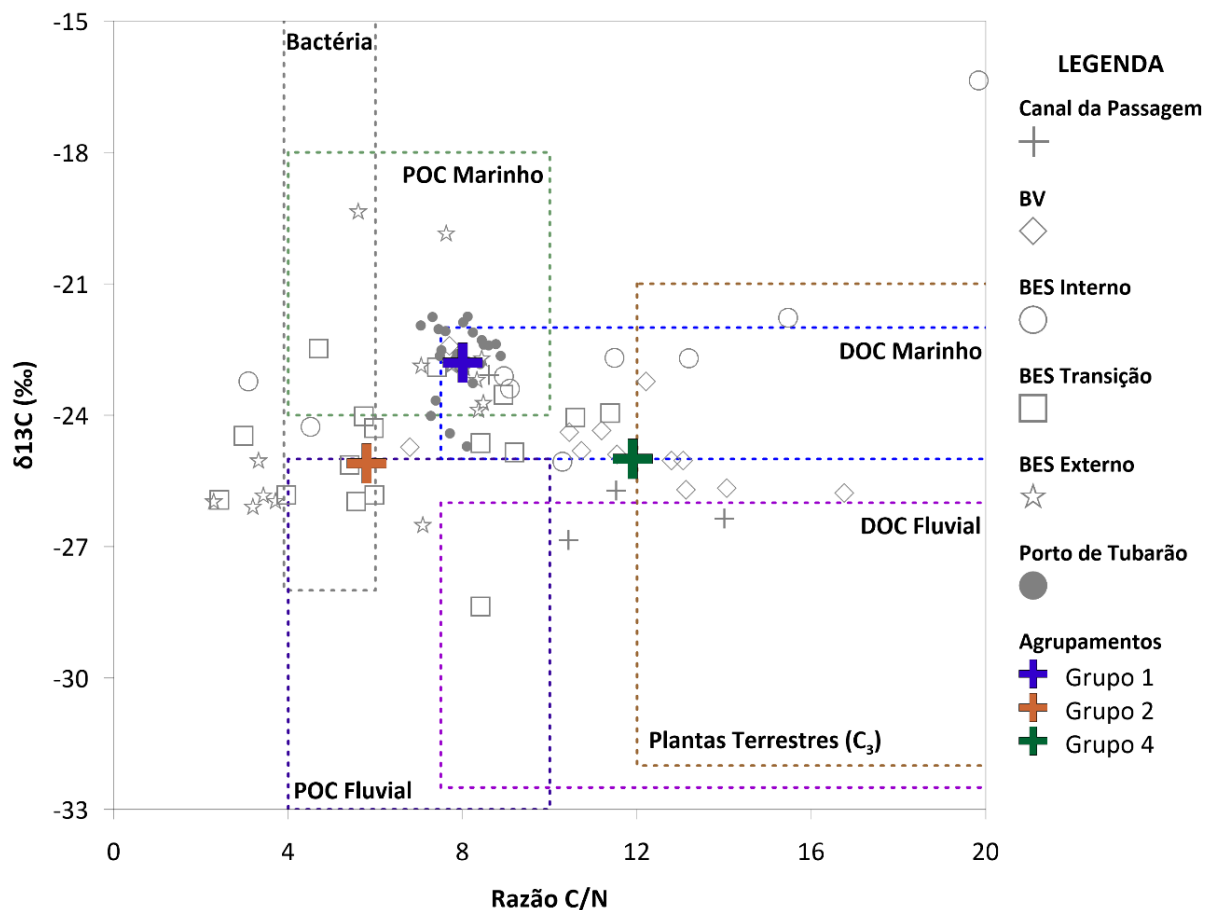


Figura 3. Relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e a razão C/N no sedimento superficial da área de estudo. Amostras com valores discrepantes dos observados pela maioria (outliers) foram desconsideradas na plotagem para facilitar a visualização e interpretação. O Grupo 3 também não é apresentado na figura devido à alta mediana de razão C/N (60,8). Adaptado de Lamb *et al.* (2006).

da pluma oriunda do Canal da Costa principalmente durante as marés vazante e alta pluviosidade. Como as bactérias possuem uma composição rica em proteína, os valores de razão C/N da sua MO tendem a ser baixos (Khan *et al.*, 2015). O sedimento superficial coletado dentro do canal do Porto de Tubarão e na área externa da BES tiveram, em sua grande maioria, um sinal típico da presença de matéria orgânica de origem marinha, com razão C/N entre 6 e 10 e valores de $\delta^{15}\text{N}$ entre -19‰ e -24‰.

Quanto ao $\delta^{15}\text{N}$, os seus valores no sedimento dependem das características locais do ciclo do nitrogênio, uma vez que as variações na taxa de fixação do nitrogênio da atmosfera, mineralização, nitrificação e desnitrificação determinam o seu fracionamento isotópico (Hogberg, 1997). Parte das amostras coletadas na BV (P65, P67, P72, entre outras) e na região interna da BES (P85 e P75) apresentou altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ (> 12‰) característicos da contribuição de esgoto tratado nessas áreas (Figura 4), uma vez que as bactérias utilizadas no tratamento possuem uma preferência enzimática por ^{14}N

em vez de ^{15}N (Savage *et al.*, 2004). Outra parte das amostras da BV e o sedimento encontrado no CP apresentaram grande variação nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ (entre 4 e 11‰), podendo ser caracterizados como ambientes de transição com contribuição de MO terrestre, oriundos de plantas superiores (Wada e Hattori, 1991), num ambiente antropogenizado.

Os baixos valores de $\delta^{15}\text{N}$ (< 4‰) observados em grande parte das amostras de sedimento, coletadas na área de transição e em algumas estações da região externa da BES, não condizem com o sinal típico de MO marinha ($\delta^{15}\text{N} \sim 7‰$) (Wada e Hattori, 1991). Esse facto pode estar relacionado com a presença de MO advinda de manguezais com baixos valores de isótopo estável de nitrogênio (Spano *et al.*, 2014) e/ou esgoto sem tratamento transportado para a região a partir da BV e CP, como Rumolo *et al.* (2011) também observaram em área portuária na Itália. O sedimento fino encontrado superficialmente no canal do Porto de Tubarão e a sul da BES apresentaram valores similares de $\delta^{15}\text{N}$ entre 4 e 7‰ e $\delta^{13}\text{C}$ entre -23 e -21‰, já evidenciando grande influência da MO marinha (Figura 4).

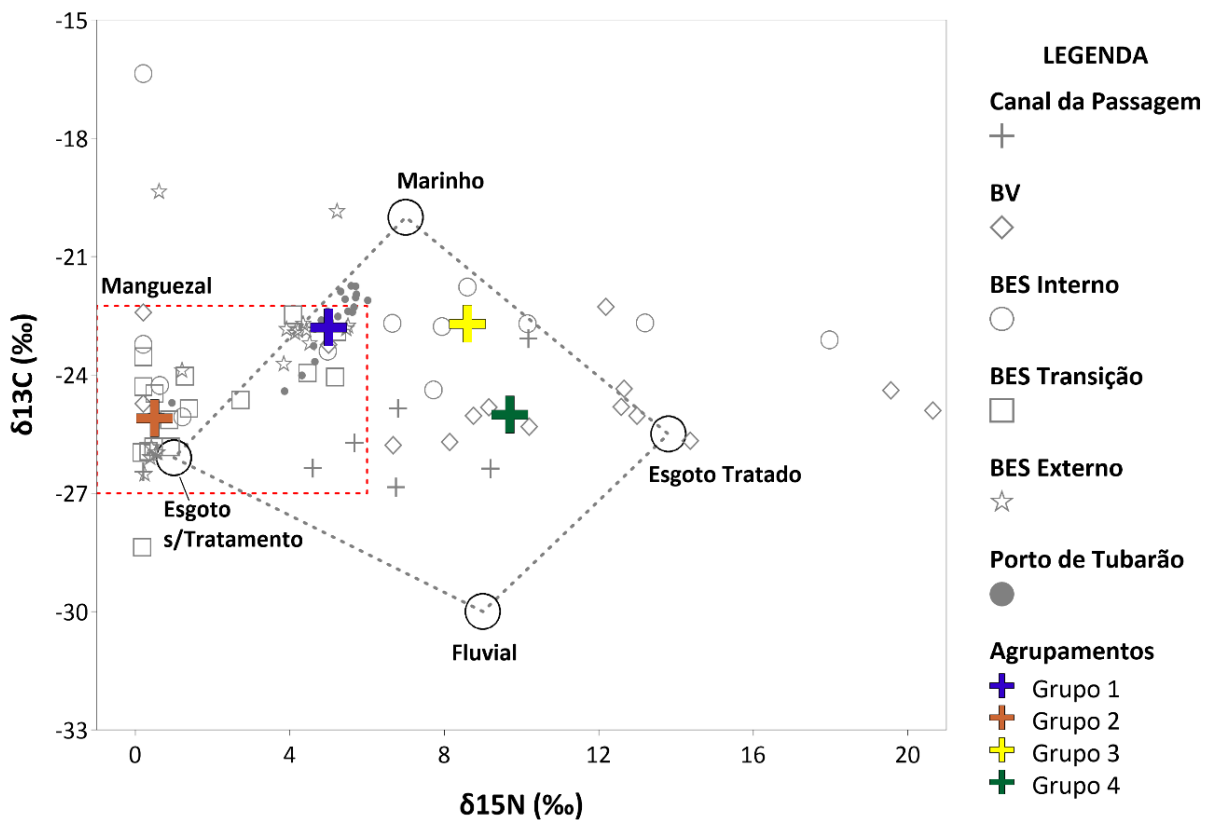


Figura 4. Relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no sedimento superficial da área de estudo. Amostras com valores discrepantes dos observados pela maioria (outliers) foram desconsiderados na plotagem para facilitar a visualização e interpretação. Adaptado de Middelburg e Nieuwenhuize (1998) e Rumolo *et al.* (2011).

3.3 Análise de agrupamento

Os parâmetros sedimentológicos e geoquímicos analisados no sedimento superficial da área de estudo apresentaram uma boa correlação entre si (Tabela 2). Somente o isótopo estável de nitrogênio não apresentou uma correlação significativa (> 50%) com algum outro parâmetro analisado, reforçando o seu forte controle na região de estudo pela influência da MO oriunda de esgoto tratado com altos valores de $\delta^{15}\text{N}$. Como esperado, o teor de MO tendeu a se correlacionar negativamente com o D50 das amostras, indicando a sua maior presença nos sedimentos mais finos, juntamente com o aumento das porcentagens de COT e NT. A correlação positiva entre $\delta^{13}\text{C}$ e a porcentagem de CaCO_3 presente no sedimento resulta do sinal isotópico relativo à influência marinha na MO e a maior presença de organismos com conchas e carapaças na região externa da BES. A forte correlação positiva entre razão C/N com COT (73,9%) e NT (52,3%) evidencia a grande influência antropogênica na região de estudo, principalmente nas áreas mais internas da BV e CP.

A partir da análise de agrupamento de observações (*cluster analysis*), 4 grupos de amostras claramente distintos foram formados (Figura 5; Tabela 3). O teste MANOVA corrobora a existência de diferença estatisticamente significativa entre esses agrupamentos ($p < 0,05$). A Figura 6 apresenta o dendograma com a similaridade entre as amostras de sedimento superficial nos agrupamentos formados, enquanto que na Figura 7 se pode observar a distribuição espacial desses grupos na área de estudo.

O Grupo 1 possui as maiores medianas de CaCO_3 (30,5%) e lama (89,6%), bem como uma alta mediana de $\delta^{13}\text{C}$ (-22,8‰) para a região estudada, este comportamento foi observado principalmente na área externa da BES e dentro do canal do

Porto de Tubarão em decorrência da grande influência marinha nessas áreas. O Grupo 2 foi encontrado ao longo de toda a área de estudo, estando principalmente presente na região de transição da BES e a norte do CP. As amostras desse grupo apresentam uma granulometria de areia média a grossa (552,3 μm) com baixa presença de MO (0,8%), COT (0,1%), CaCO_3 (5,9%), $\delta^{13}\text{C}$ (-25,1‰), $\delta^{15}\text{N}$ (0,5‰) e os menores valores de razão C/N (5,8). Portanto, o Grupo 2 apresenta características de sedimento terrígeno com MO de ambientes terrestres (manguezal), quando se analisa os isótopos estáveis, também abrangendo parte da região da BES com aumento da presença de MO marinha.

O Grupo 3 ficou restrito à região interna da BES, próxima à praia de Camburi, com algumas observações pontuais na BV, CP e BES. Os altos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (-22,7‰), $\delta^{15}\text{N}$ (8,6‰) e CaCO_3 (21,8%) observados nesse grupo indicam uma grande contribuição de MO marinha. Entretanto, o alto valor de mediana de razão C/N do Grupo 3 indica aporte de carbono antrópico em algumas regiões, com possível contaminação por hidrocarbonetos, assim como observado por Costa *et al.* (2015) nos sedimentos superficiais do CP. O Grupo 4 somente foi observado nas regiões internas da BV e CP. A maior presença de MO no sedimento desse grupo, acompanhado das maiores medianas de COT (3,5%), NT (0,34%) e $\delta^{15}\text{N}$ (9,7‰) evidencia a forte influência antropogênica na MO presente nesses locais.

3.4 Fontes da matéria orgânica e sedimento superficial

Os resultados obtidos na análise de agrupamento, a partir da integração dos diferentes parâmetros sedimentológicos e geoquímicos avaliados, permitiram comprovar a contribuição de

Tabela 2. Correlação não-paramétrica de Spearman realizada entre os parâmetros sedimentológicos e geoquímicos analisados no sedimento superficial da área de estudo. Os números com forte correlação (> 0,5) então sublinhados, enquanto os valores com muito forte correlação (> 0,7) se apresentam em negrito.

	Teor de Água (%)	MO (%)	CaCO3 (%)	Lama (%)	D50 (um)	NT (%)	COT (%)	Razão C/N	$\delta^{13}\text{C}$
MO (%)	<u>0,61</u>								
CaCO3 (%)	0,246	0,45							
Lama (%)	<u>0,657</u>	0,81	0,383						
D50 (um)	-0,704	-0,784	-0,367	-0,911					
NT (%)	<u>0,672</u>	0,89	0,352	0,765	-0,768				
COT (%)	<u>0,618</u>	0,867	0,439	0,741	<u>-0,683</u>	0,912			
Razão C/N	-0,008	<u>0,579</u>	0,162	0,251	-0,219	<u>0,523</u>	0,739		
$\delta^{13}\text{C}$	0,373	0,286	<u>0,595</u>	0,429	-0,456	0,436	0,255	0,01	
$\delta^{15}\text{N}$	-0,09	0,028	-0,11	-0,244	0,252	0,463	0,183	0,432	-0,194

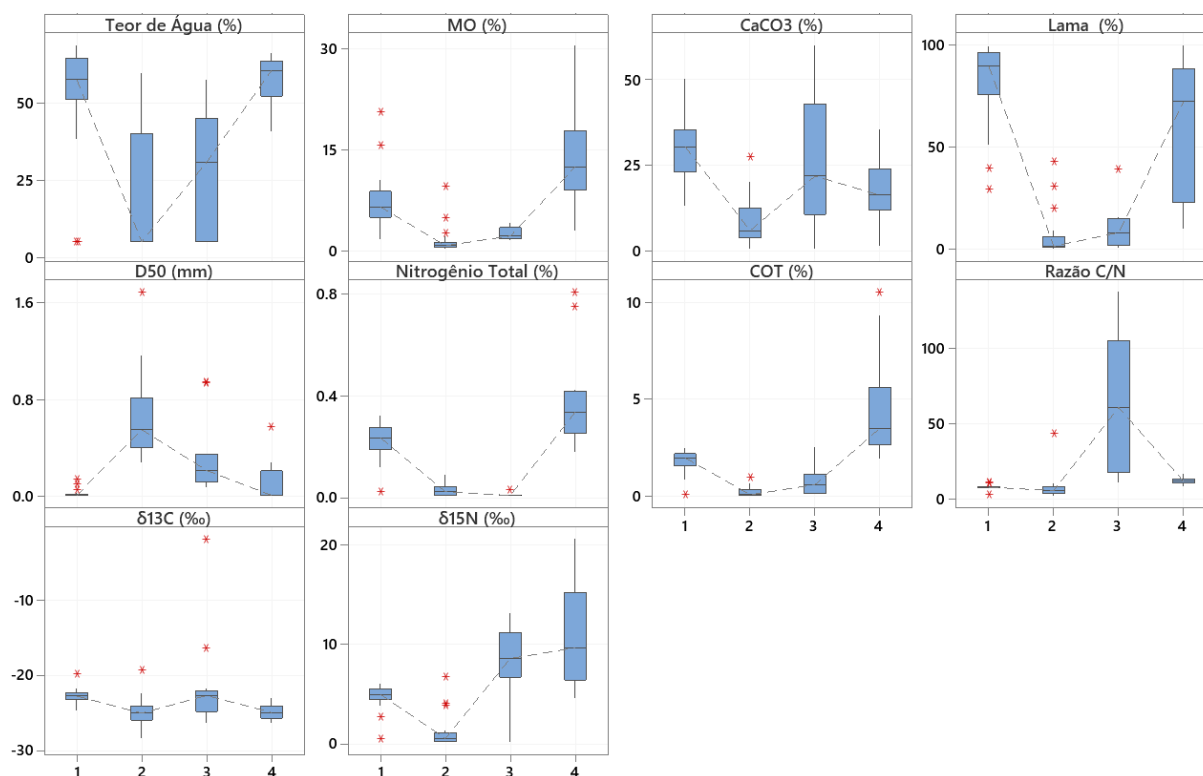


Figura 5. Boxplot com a variação dos parâmetros sedimentológicos e geoquímicos para os quatro grupos formados.

Tabela 3. Valores das medianas dos parâmetros analisados para cada grupo. Os maiores e menores valores encontrados foram deixados em negrito e sublinhados, respectivamente, para cada variável.

Grupo	Teor de Água (%)	MO (%)	CaCO3 (%)	Lama (%)	D50 (um)	Nitrogênio Total (%)	COT (%)	Razão C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N° Amostras
1	57,7	6,5	30,5	89,6	<u>8,7</u>	0,24	2,0	8,0	-22,8	5,0	36
2	<u>5,0</u>	<u>0,8</u>	<u>5,9</u>	<u>1,4</u>	552,3	0,02	<u>0,1</u>	<u>5,8</u>	<u>-25,1</u>	<u>0,5</u>	28
3	30,8	2,2	21,8	8,1	215,3	<u>0,01</u>	0,6	60,8	-22,7	8,6	13
4	60,6	12,5	16,2	72,3	9,7	0,34	3,5	11,9	-25,0	9,7	14

diferentes fontes de MO no sedimento estudado. A alternância da presença dos Grupos 3 e 4 ao longo da maior parte da BV e CP é característica de ambientes de transição entre áreas continentais e marinhas. A interação entre o aporte fluvial e a ação das marés na região, bem como as suas consequências para a hidrodinâmica e distribuição do sedimento superficial foram discutidas por Veronez *et al.* (2009), Nascimento *et al.* (2013) e Garonce e Quaresma (2014).

O aporte de MO oriundo de ação antrópica, como esgoto e hidrocarbonetos, também foi evidente nesses ambientes

internos em decorrência dos elevados valores de COT, NT e nas amostras. A grande presença de $\delta^{15}\text{N}$ na BV e no CP também foi observada por Costa *et al.* (2015) em testemunhos e por Souza *et al.* (2018) em amostras próximas aos manguezais, sendo relacionada com a poluição antrópica nessas regiões internas devido à rápida urbanização das últimas décadas. Além disso, Grilo *et al.* (2013) também verificou o aumento do COT na parte superficial de testemunhos coletados em planícies de maré do CP, com variação na razão C/N ao longo dos anos, em decorrência do aporte de MO terrígena e de esgoto na região. A presença do Grupo 2 (Razão C/N = 5,8, MO = 0,8%, COT = 0,1%,

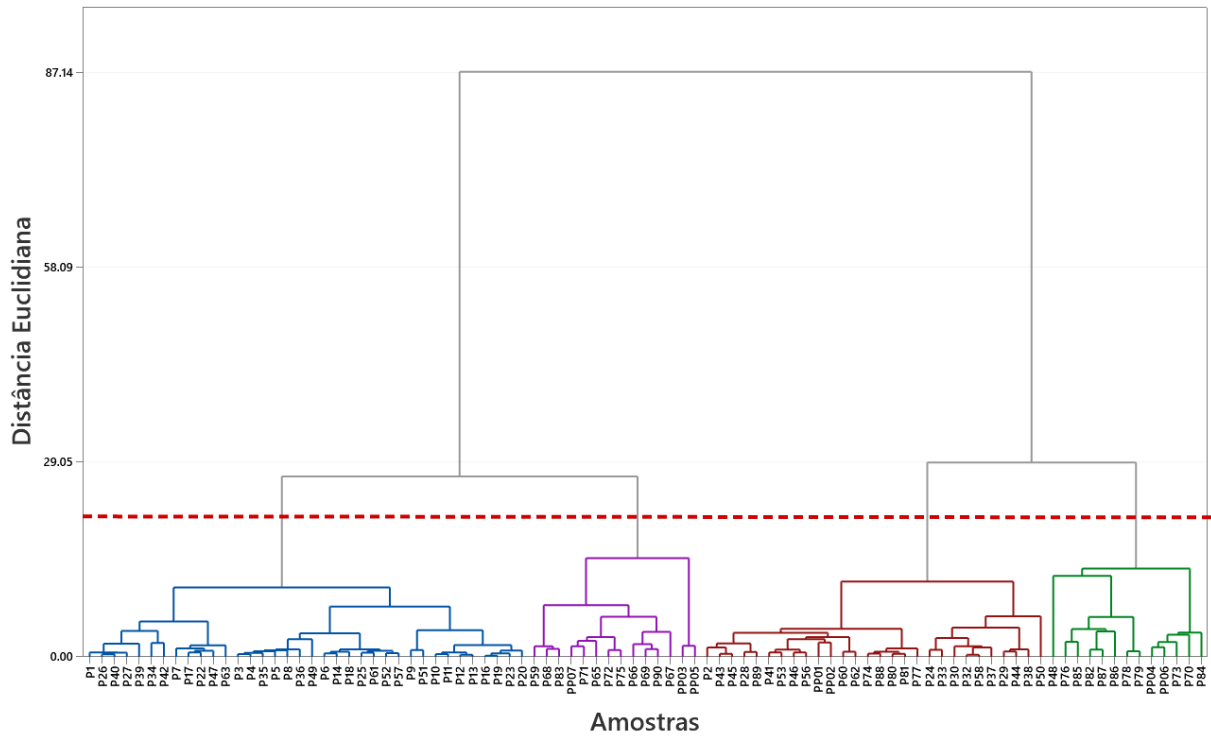


Figura 6. Dendrograma com a distribuição das amostras nos agrupamentos formados. As linhas azuis, rosas, vermelhas e verdes representam os Grupos 1, 4, 2 e 3.

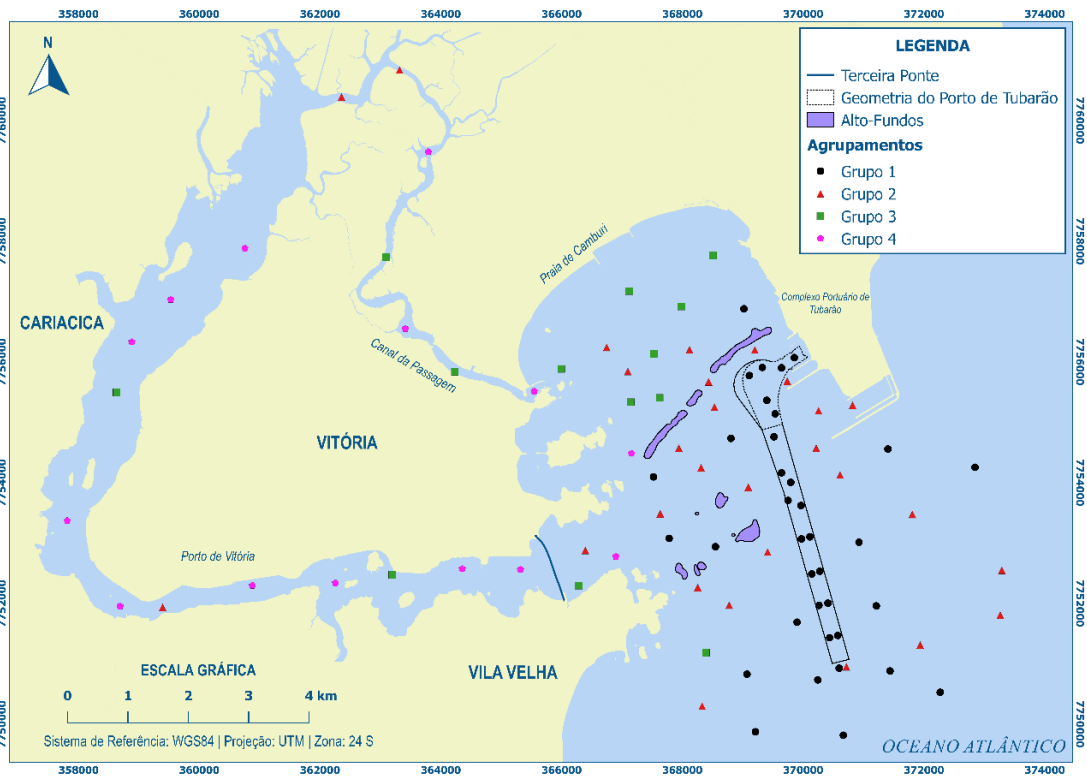


Figura 7. Distribuição espacial dos quatro grupos na área de estudo.

NT = 0,02%, $\delta^{13}\text{C}$ = -25,1‰, $\delta^{15}\text{N}$ = 0,5‰) com características isotópicas de MO terrígena ao norte da BV sugere o aporte dos manguezais bem desenvolvidos na região (Jesus *et al.*, 2004).

A classificação de grande parte do sedimento arenoso observado na região interna da BES como Grupo 3, cujos valores para isótopos estáveis indicam influência marinha ($\delta^{13}\text{C}$ = -22,7‰; $\delta^{15}\text{N}$ = 8,6‰), parece ser uma resposta a deposição de MO de fitoplâncton marinho. O retrabalhamento desse sedimento a partir das trocas transversais entre a praia e a antepraia, bem como o transporte longitudinal na direção NE, promovem uma resposta de adaptação morfodinâmica da praia com transporte do sedimento e MO, afinamento da granulometria ao longo desse transporte e retenção do material nas proximidades da praia (Albino *et al.*, 2001). A existência do alto-fundo na porção central da BES, disposto longitudinalmente à praia com profundidades mínimas de 2 m, parece ser um obstáculo que impede a troca efetiva desse sedimento mais grosso entre a área mais interna e externa da BES. No estudo de Bastos *et al.* (2014) o transporte residual de fundo na região interna da BES foi em direção à praia, corroborando a observação de menor contribuição de sedimentos e MO oriunda da área próxima à Praia de Camburi para a porção central e externa, bem como para canal do Porto de Tubarão, no presente estudo.

A porção central e externa da BES apresentou uma alternância entre sedimento arenoso pertencente ao Grupo 2 e material lamoso classificado como Grupo 1. A similaridade observada, a partir da análise de agrupamentos, entre o sedimento arenoso presente nessa região da BES com as amostras coletadas mais a norte da BV (PPO1 e PPO2), além da ocorrência de valores mais baixos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nas amostras do Grupo 2, demonstram o aporte de sedimento e MO terrestre da BV na BES. Garonce e Quaresma (2014) também observaram exportação de material particulado em suspensão (MPS) da BV para BES principalmente durante as vazantes de marés de sizígia no período chuvoso. Mesmo tendo uma correlação positiva com o sedimento fino, os elevados valores de COT (2%) e NT (0,24%) presentes no sedimento lamoso da porção central e externa da BES, bem como observado dentro do canal do Porto de Tubarão, também sugerem a BV como a principal fonte de MO terrestre e antrópica na BES, devido a sua similaridade com valores observados nos sedimentos finos encontrados dentro da BV (Grupo 4). Valores de COT e NT semelhantes também foram encontrados por Burone *et al.* (2003), Lazăr *et al.* (2012) e Tang *et al.* (2018) em regiões costeiras com grande influência de aporte de MO de origem antrópica.

Como a MO aquática de origem terrígena tende a apresentar muitas substâncias húmicas refratárias (Primo *et al.*, 2011) quando comparado a MO marinha lábil composta por mais proteínas, a maior oxigenação do sedimento superficial arenoso, causado pela sua maior porosidade, tende a proporcionar uma degradação preferencial dos compostos nitrogenados marinhos e oriundos do esgoto, mantendo preservada a MO terrestre no Grupo 2. Por sua vez, a MO rica em nitrogênio advinda da BV se mantém presente no sedimento lamoso observado na BES, tornando a mistura entre o material fino terrestre com o sedimento e a MO marinha característica das lamas observadas na BES (Grupo 1). Portanto, pode-se endereçar que o sedimento fino e MO observada no canal do Porto de Tubarão são advindos principalmente da BV e região marinha adjacente à BES.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal a realização de análises sedimentológicas e geoquímicas no sedimento superficial da BES e adjacências, de modo a determinar a proveniência dos sedimentos finos colmatados no Porto de Tubarão. Devido ao elevado potencial de ocorrência de impactos negativos durante e após a execução de obras de dragagem, há uma grande demanda por amplo conhecimento da qualidade do material dragado e da dinâmica sedimentar na região do porto, de modo a subsidiar o planejamento e gerenciamento dessas obras com a efetiva mitigação dos impactos negativos para o meio ambiente e sociedade.

A boa correlação entre os parâmetros sedimentológicos e geoquímicos do sedimento superficial analisados permitiu a separação das amostras em 4 grupos estatisticamente diferentes. A partir da análise de similaridade entre as amostras e os grupos formados, classificou-se a alternância entre os Grupos 4 e 3 na BV e CP como uma característica da transição entre áreas continentais antropizadas e marinhas. Os elevados teores de MO (>12%), COT (> 3,5%), NT (0,3%) e $\delta^{15}\text{N}$ (> 9‰) e os altos valores da razão C/N observados em grande parte da BV e CP sugerem o predomínio de sedimento terrígeno altamente antropizado na região pelo lançamento de esgoto bruto e tratado. Baixos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (< 25‰) associados a valores discrepantes de razão C/N também foram observados na BV e CP (P70, P73, P84, PPO4 e PPO6) e indicam presença de efluentes contaminados por hidrocarbonetos.

Na BES, a localização restrita das amostras classificadas como Grupo 3 na porção interna da baía sugere a atuação do alto-fundo, presente na porção central da BES, como um obstáculo que impede o efetivo transporte de sedimento entre as áreas

mais interna e externa. A alternância entre as amostras com granulometria mais grossa (Grupo 2) e mais fina (Grupo 1) na porção central e externa da BES indica uma clara mistura entre o sedimento terrígeno, oriundo da BV, e marinho na região. Os elevados valores de COT (~2,1%) e NT (~0,27%) presentes no sedimento lamoso dentro do canal do Porto de Tubarão (Grupo 1), ligeiramente mais baixos que os valores encontrados no Grupo 4 característico do ambiente antropizado da BV, também sugere a contribuição da MO e material fino dessa região no canal do porto.

Como sugestão futura, a busca por compostos específicos, considerados como biomarcadores pela literatura, no sedimento superficial encontrado no Porto de Tubarão seria um importante complemento para os resultados do presente estudo. Por exemplo, o taraxerol é um terpenóide específico do mangue, assim como o coprostanol é tido como traçador de aporte de esgoto e poderiam corroborar o aporte de MO da BV na região do porto. A análise espacial da presença desses biomarcadores no sedimento encontrado dentro da área navegável do porto também pode contribuir para a definição das principais áreas de aporte de sedimento fino e MO advinda da BV.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento do estudo através do edital FAPES/VALE/FAPERJ N° 01/2015 – Pelotização, Meio Ambiente e Logística.

REFERÊNCIAS

- Agunwamba, J. C., Onuoha, K. C., Okoye, A. C. (2012). Potential effects on the marine environment of dredging of the Bonny channel in the Niger Delta. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(11), 6613-6625. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2446-3>
- Albino, J., Coelho, A. L. N., Girardi, G., Nascimento, K. A. (2018). Espírito Santo. In D. Muehe (Ed.), *Panorama da Erosão Costeira no Brasil* (pp. 433-477). Ministério de Meio Ambiente. https://www.researchgate.net/publication/329247970_Panorama_da_erosao_costeira_no_Brasil
- Albino, J., Contti Neto, N., Oliveira, T. C. A. (2016). The beaches of Espírito Santo. In A. H. F. Klein & A. Short (Eds.), *Brazilian Beach Systems Book* (Springer, p. 611). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_13
- Albino, J., Oliveira, R., Maia, L. P., Nascimento, K. A. (2001). *Processos atuais de sedimentação marinha e praia do litoral de Vitória*, ES. Relatório n. 198.2506/ 2000. FACITEC & Prefeitura Municipal de Vitória. 2001.

Amos, C. L., Sutherland, T. F., Radziejewski, B., Doucette, M. (1996). A rapid technique to determine bulk density of fine-grained sediments by X-ray computed tomography. *Journal of Sedimentary Research*, 66(5), 1023-1024. <https://doi.org/10.1306/D4268144-2B26-11D7-8648000102C1865D>

ANA (2011). *Guia nacional de coletas e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/GuiaNacionalDeColeta.pdf>

Andrews, J. E., Greenaway, A. M., Dennis, P. F. (1998). Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Hunts Bay, Kingston Harbour, Jamaica. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46(5), 743-756. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0305>

Bastos, A. C., Costa Moscon, D. M., Carmo, D., Neto, J. A. B., Quaresma, V. S. (2014). Modern sedimentation processes in a wave-dominated coastal embayment: Espírito Santo Bay, southeast Brazil. *Geo-Marine Letters*, 35(1), 23-36. <https://doi.org/10.1007/s00367-014-0387-x>

Benedict, C. R., Wong, W. W. L., Wong, J. H. H. (1980). Fractionation of the Stable Isotopes of Inorganic Carbon by Seagrasses. *Plant Physiology*, 65(3), 512-517. <https://doi.org/10.1104/pp.65.3.512>

Bordovskiy, O. K. (1965). Accumulation of organic matter in bottom sediments. *Marine Geology*, 3(1-2), 33-82. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(65\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0025-3227(65)90004-6)

BURONE, L., MUNIZ, P., PIRES-VANIN, A. M. S., RODRIGUES, M. (2003). Spatial distribution of organic matter in the surface sediments of Ubatuba Bay (Southeastern - Brazil). *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 75(1), 77-80. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652003000100009>

Buruam, L. M., Hortellani, M. A., Sarkis, J. E., Costa-Lotufo, L. v., Abessa, D. M. S. (2012). Contamination of port zone sediments by metals from Large Marine Ecosystems of Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 64(3), 479-488. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.017>

Costa, E. S., Grilo, C. F., Wolff, G. A., Thompson, A., Figueira, R. C. L., Neto, R. R. (2015). Evaluation of metals and hydrocarbons in sediments from a tropical tidal flat estuary of Southern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1-2), 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.11.028>

Deines, P. (1980). The isotopic composition of reduced organic carbon. In *The Terrestrial Environment*, A (pp. 329-406). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41780-0.50015-8>

Dias, J. A. (2004). *A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos: A curva granulométrica*. Universidade de Algarve. https://www.academia.edu/3170602/A_ANALISE_SEDIMENTAR_E_O_CONHECIMENTO_DOS_SISTEMAS_MARINHOS_Um_a_Introducao_A7C3A3o_C3A0_Oceanografia_GeolC3B3gica

- di Leonardo, R., Cundy, A. B., Bellanca, A., Mazzola, A., Vizzini, S. (2012). Biogeochemical evaluation of historical sediment contamination in the Gulf of Palermo (NW Sicily): Analysis of pseudo-trace elements and stable isotope signals. *Journal of Marine Systems*, 94, 185-196. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.11.022>
- Fettweis, M., Baeye, M., Francken, F., Lauwaert, B., Eynde, D. van den, Lancker, V. van, Martens, C., Michielsen, T. (2011). Monitoring the effects of disposal of fine sediments from maintenance dredging on suspended particulate matter concentration in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 62(2), 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.11.002>
- Fettweis, M., Baeye, M., Cardoso, C., Dujardin, A., Lauwaert, B., van den Eynde, D., van Hoestenbergh, T., Vanlede, J., van Poucke, L., Velez, C., Martens, C. (2016). The impact of disposal of fine-grained sediments from maintenance dredging works on SPM concentration and fluid mud in and outside the harbor of Zeebrugge. *Ocean Dynamics*, 66(11), 1497-1516. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0996-1>
- Four, I. du, Lancker, V. van. (2008). *Changes of sedimentological patterns and morphological features due to the disposal of dredge spoil and the regeneration after cessation of the disposal activities*. 255, 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.04.011>
- Fry, B., Gace, A., McClelland, J. W. (2003). Chemical Indicators of Anthropogenic Nitrogen-Loading in Four Pacific Estuaries. *Pacific Science*, 57(1), 77-101. <https://doi.org/10.1353/psc.2003.0004>
- Gao, S., Collins, M. (1992). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors." *Sedimentary Geology*, 81(1-2), 47-60. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(92\)90055-V](https://doi.org/10.1016/0037-0738(92)90055-V)
- Gao, X., Yang, Y., & Wang, C. (2012). Geochemistry of organic carbon and nitrogen in surface sediments of coastal Bohai Bay inferred from their ratios and stable isotopic signatures. *Marine Pollution Bulletin*, 64(6), 1148-1155. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.03.028>
- Garonce, F. A. A., Quaresma, V. S. (2014). Hydrodynamic aspects at Vitória Bay Mouth, ES. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 86(2), 555-570. <https://doi.org/10.1590/0001-37652014114012>
- Ghazali, F. M., Rahman, R. N. Z. A., Salleh, A. B., Basri, M. (2004). Biodegradation of hydrocarbons in soil by microbial consortium. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54(1), 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2004.02.002>
- Hedges, J. I., Stern, J. H. (1984). Carbon and nitrogen determinations of carbonate-containing solids. *Limnology and Oceanography*, 29(3), 657-663. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.3.0657>
- Hogberg, P. (1997). Tansley Review No. 95. 15N natural abundance in soil-plant systems. *New Phytologist*, 137(2), 179-203. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00808.x>
- Hossain, M. B., Marshall, D. J., Venkatramanan, S. (2014). Sediment granulometry and organic matter content in the intertidal zone of the sungai brunei estuarine system, Northwest coast of Borneo. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9(2), 231-239. https://www.researchgate.net/publication/261062961_Sediment_granulometry_and_organic_matter_content_in_the_intertidal_zone_of_the_Sungai_Brunei_estuarine_system_northwest_coast_of_Borneo
- Hyland, J., Balthis, L., Karakassis, I., Magni, P., Petrov, A., Shine, J., Vestergaard, O., Warwick, R. (2005). Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos. *Marine Ecology Progress Series*, 295(May 2014), 91-103. <https://doi.org/10.3354/meps295091>
- Jesus, H. C. de, Costa, E. de A., Mendonça, A. S. F., Zandonade, E. (2004). Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da Ilha de Vitória-ES. *Química Nova*, 27(3), 378-386. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422004000300004>
- Keeley, J. E., Sandquist, D. R. (1992). Carbon: freshwater plants. *Plant, Cell and Environment*, 15(9), 1021-1035. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01653.x>
- Khan, N. S., Vane, C. H., Horton, B. P. (2015). Stable carbon isotope and C/N geochemistry of coastal wetland sediments as a sea-level indicator. *Handbook of Sea-Level Research*, 295-311. <https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch20>
- Kirby, R. (2011). Minimising harbour siltation-findings of PIANC Working Group 43. *Ocean Dynamics*, 61(2-3), 233-244. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0336-9>
- Lamb, A. L., Wilson, G. P., Leng, M. J. (2006). A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using ¹³C and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 75(1-4), 29-57. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.003>
- Lazăr, L., Gomoiu, M. T., Boicenco, L., Vasiliu, D. (2012). Total Organic Carbon (TOC) of the surface layer sediments covering the seafloor of the Romanian Black Sea coast. *Geo-Eco-Marina*, 18(March 2018), 121-132. <https://doi.org/10.5281/zenodo.56875>
- Lee, J., Kwon, B. O., Kim, B., Noh, J., Hwang, K., Ryu, J., Park, J., Hong, S., Khim, J. S. (2019). Natural and anthropogenic signatures on sedimentary organic matters across varying intertidal habitats in the Korean waters. *Environment International*, 133(July), 105166. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105166>
- Lehrback, B. D., Rodrigues Neto, R., Fonseca Barroso, G., Bernardes, M. (2016). Fontes e Distribuição da Matéria Orgânica Sedimentar na Porção Noroeste da Baía de Vitória, ES. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 20(1). <https://doi.org/10.14210/bjast.v20n1.4793>
- le Roux, J. P. (1994). An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends. *Sedimentary Geology*, 94(1-2), 97-107. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90149-X)

- Liu, M., Hou, L. J., Xu, S. Y., Ou, D. N., Yang, Y., Yu, J., Wang, Q. (2006). Organic carbon and nitrogen stable isotopes in the intertidal sediments from the Yangtze Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 52(12), 1625–1633. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.06.008>
- McLaren, P. (1981). An Interpretation of Trends in Grain Size Measures. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 51(2), 611–624. <https://doi.org/10.1306/212f7cf2-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- McLaren, P., Bowles, D. (1985). The Effects of Sediment Transport on Grain-Size Distributions. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 55(4). <https://doi.org/10.1306/212f86fc-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Meyers, P. A. (1997). Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27(5–6), 213–250. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00049-1)
- Middelburg, J. J., Nieuwenhuize, J. (1998). Carbon and nitrogen stable isotopes in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary. *Marine Chemistry*, 60(3–4), 217–225. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(97\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(97)00104-7)
- Nascimento, T., Chacaltana, J., Piccoli, F. (2013). Análise da Influência do Alargamento de um Estreitamento na Hidrodinâmica do Canal da Passagem, Vitória-ES, Através de Modelagem Numérica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 31–39. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p31-39>
- Okada, T., Larcombe, P., Mason, C. (2009). Estimating the spatial distribution of dredged material disposed of at sea using particle-size distributions and metal concentrations. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1164–1177. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.03.023>
- Orpin, A. R., Ridd, P. v., Thomas, S., Anthony, K. R. N., Marshall, P., Oliver, J. (2004). Natural turbidity variability and weather forecasts in risk management of anthropogenic sediment discharge near sensitive environments. *Marine Pollution Bulletin*, 49(7–8), 602–612. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.03.020>
- Peterson, B., Fry, B., Hullar, M., Saupe, S., Wright, R. (1994). The Distribution and Stable Carbon Isotopic Composition of Dissolved Organic Carbon in Estuaries. *Estuaries*, 17(1), 111. <https://doi.org/10.2307/1352560>
- Prahl, F. G., Bennett, J. T., Carpenter, R. (1980). The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(12), 1967–1976. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90196-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90196-9)
- Primo, D. C., Menezes, R. S. C., Silva, T. O. (2011). Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. *Scientia Plena*, 7(5), 1–13. <https://www.scienciaplena.org.br/sp/article/view/342>
- Quaresma, V. D. S., Bastos, A. C., Loureiro, D. v., Paixão, S. (2011). Utilização de métodos geofísicos para mapeamento de lama fluida no porto de tubarão, vitória (ES-Brasil). *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(3), 487–496. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v29i3.94>
- Rumolo, P., Barra, M., Gherardi, S., Marsella, E., Sprovieri, M. (2011). Stable isotopes and C/N ratios in marine sediments as a tool for discriminating anthropogenic impact. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(12), 14. <https://doi.org/10.1039/c1em10568j>
- Savage, C., Leavitt, P. R., Elmgren, R. (2004). Distribution and retention of effluent nitrogen in surface sediments of a coastal bay. *Limnology and Oceanography*, 49(5), 1503–1511. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.5.1503>
- Silliman, J. E., Meyers, P. A., Bourbonniere, R. A. (1996). Record of postglacial organic matter delivery and burial in sediments of Lake Ontario. *Organic Geochemistry*, 24(4), 463–472. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(96\)00041-1](https://doi.org/10.1016/0146-6380(96)00041-1)
- Simonini, R., Ansaloni, I., Cavallini, F., Graziosi, F., Iotti, M. (2005). Effects of long-term dumping of harbor-dredged material on macrozoobenthos at four disposal sites along the Emilia-Romagna coast (Northern Adriatic Sea , Italy). 50, 1595–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.06.031>
- Smith, S. D. A., Rule, M. J. (2001). The Effects of Dredge-Spoil Dumping on a Shallow Water Soft-Sediment Community in the Solitary Islands Marine Park, NSW, Australia. 42(11). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00059-5)
- Souza, I. da C., Arrivabene, H. P., Craig, C. A., Midwood, A. J., Thornton, B., Matsumoto, S. T., Elliott, M., Wunderlin, D. A., Monferrán, M. v., Fernandes, M. N. (2018). Interrogating pollution sources in a mangrove food web using multiple stable isotopes. *Science of the Total Environment*, 640–641, 501–511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.302>
- Spano, S., Belem, A. L., Doria, R. N., Zucchi, M. do R., Souza, J. R. B. de, Costa, A. B., Lentini, C. A. D., Azevedo, A. E. G. de. (2014). Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter of Nova Viçosa-Caravelas estuarine complex, southern Bahia, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 44(1), 13–21. <https://doi.org/10.5327/z2317-4889201400010003>
- Stockmann, K., Riethmüller, R., Heineke, M., Gayer, G. (2009). On the morphological long-term development of dumped material in a low-energetic environment close to the German Baltic coast. *Journal of Marine Systems*, 75(3–4), 409–420. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.04.010>
- Stronkhorst, J., Arieze, F., Hattum, B. van, Postma, J. F., Kluijver, M. de. (2003). Environmental impact and recovery at two dumping sites for dredged material in the North Sea. 124, 17–31. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00430-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00430-X)

- Tang, H., Ke, Z., Yan, M., Wang, W., Nie, H., Li, B., Zhang, J., Xu, X., Wang, J. (2018). Concentrations, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Daya Bay, China. *Water*, 10(6), 15. <https://doi.org/10.3390/w10060780>
- van Rijn, L. C. (2016). *Harbour siltation and control measures*. Online. <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Harboursiltation2012.pdf>
- Veronez Júnior, P., Bastos, A. C., Quaresma, V. S. (2009). Morfologia e distribuição sedimentar em um sistema estuarino tropical: Baía de Vitória, ES. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(4), 609-624. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2009000400006>
- Vestergaard, O., Warwick, R. (2005). Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos. *Marine Ecology Progress Series*, 295(May 2014), 91-103. <https://doi.org/10.3354/meps295091>
- Vieira, F. v., Bastos, A. C., Quaresma, V. S., Leite, M. D., Costa, A., Oliveira, K. S. S., Dalvi, C. F., Bahia, R. G., Holz, V. L., Moura, R. L., Amado Filho, G. M. (2019). Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research*, 187(August), 103964. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103964>
- Wada, E., Hattori, A. (1991). *Nitrogen in the Sea: Forms, Abundances, and Rate Processes*. CRC Press. 224p.
- Yamaguchi, H., Montani, S., Tsutsumi, H., Hamada, K., Ueda, N. (2003). Estimation of particulate organic carbon flux in relation to photosynthetic production in a shallow coastal area in the Seto Inland Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 47(1-6), 18-24. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00414-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00414-9)
- Yamashita, S., Naruse, H., Nakajo, T. (2011). Sediment transport pathways on the modern microtidal sand flat reconstructed by the new method of sediment trend analysis (P-GSTA): Case studies of Kushida River and Obitsu River deltas, Japan. *Journal of the Sedimentological Society of Japan*, 70(1), 31-36. <https://doi.org/10.4096/jssj.70.31>

**SUPPORTING INFORMATION I -
PROVENIÊNCIA DOS SEDIMENTOS FINOS PARA O PORTO DE TUBARÃO, BRASIL**

Tabela 1. Resultados das análises sedimentológicas e geoquímicas no sedimento superficial do Porto de Tubarão, Vitória-ES. Coordenadas em WGS84/UTM Zona 24S.

Amostra	X	Y	Densidade Superficial (kg/m ³)	Teor de Água (%)	MO (%)	CaCO ₃ (%)	Cascalho (%)	Areia (%)	Lama (%)	D50 (µm)	Nitrogênio Total (%)	COT (%)	Razão C/N	Isótopo δ ¹³ C	Isótopo δ ¹⁵ N
P1	370595,4	7750925,8	1047,47	0,39	3,76	35,63	0,12	38,40	61,48	30,50	0,15	1,24	8,23	-23,27	4,61
P2	370714,3	7750948,1	-	-	1,03	17,77	12,51	81,68	5,81	901,03	0,09	0,69	7,71	-24,42	3,86
P3	370439,2	7751431,4	1063,87	0,65	6,13	40,99	0,07	8,90	91,03	9,38	0,28	2,22	8,01	-21,88	5,32
P4	370573,1	7751468,6	1126,52	0,59	6,54	40,66	0,31	15,21	84,48	10,89	0,24	2,06	8,76	-22,38	5,51
P5	370260,8	7751966,8	1066,62	0,63	9,13	40,08	0,00	7,01	92,99	8,55	0,30	2,45	8,11	-21,75	5,59
P6	370409,5	7752004,0	1016,19	0,53	8,83	33,26	0,00	3,36	96,64	7,37	0,28	2,06	7,45	-22,04	5,71
P7	370141,8	7752487,3	1075,09	0,51	2,72	13,14	0,32	34,73	64,96	16,37	0,12	0,87	7,28	-24,02	4,31
P8	370275,6	7752531,9	909,17	0,56	8,86	50,30	0,00	5,86	94,14	7,24	0,24	2,08	8,59	-22,41	5,62
P9	369970,9	7753068,2	1202,27	0,67	15,70	29,45	0,02	1,27	98,71	6,83	0,27	2,24	8,44	-22,29	5,66
P10	370110,6	7753101,7	1152,21	0,64	8,14	26,60	0,09	2,00	97,91	7,01	0,30	2,10	7,04	-21,95	5,72
P11	369749,6	7753704,8	1019,07	0,60	8,01	31,29	0,00	1,82	98,18	7,22	0,32	2,36	7,31	-21,75	5,70
P12	369965,3	7753621,2	1081,12	0,60	9,13	24,33	0,00	1,04	98,96	6,36	0,30	2,50	8,24	-22,11	6,02
P13	369641,8	7754162,1	1098,81	0,61	10,10	25,23	0,00	0,78	99,22	4,78	0,30	2,51	8,48	-22,39	4,97
P14	369794,5	7754004,4	998,78	0,61	8,67	29,93	0,00	2,46	97,54	6,39	0,24	2,16	8,88	-22,65	4,96
P16	369515,8	7754759,2	966,58	0,68	8,89	20,06	0,00	4,26	95,74	5,58	0,27	2,06	7,51	-22,52	5,24
P17	369537,6	7755140,5	934,30	0,65	3,59	14,84	0,89	12,78	86,33	6,85	0,21	1,80	8,40	-22,84	4,65
P18	369397,7	7755363,5	946,43	0,69	6,80	31,71	0,02	11,29	88,69	7,29	0,25	2,00	8,11	-22,78	4,81
P19	369108,2	7755773,4	972,55	0,67	9,52	19,03	0,00	3,22	96,78	6,35	0,27	2,03	7,48	-22,64	5,05
P20	369323,5	7755908,6	964,13	0,68	6,58	19,54	0,00	0,98	99,02	5,36	0,32	2,44	7,61	-22,08	5,43
P22	369641,4	7755902,4	1112,88	0,53	3,14	13,85	0,01	25,74	74,25	8,94	0,23	1,69	7,38	-23,67	4,65
P23	369853,5	7756071,6	964,33	0,67	10,56	15,42	0,02	9,42	90,57	6,01	0,25	1,96	7,87	-22,61	4,82
P24	369736,0	7755681,7	1021,74	0,52	4,88	4,99	0,77	68,54	30,69	411,41	0,05	0,36	8,10	-24,71	0,94
P25	371438,8	7750880,5	1078,01	0,49	8,57	33,11	0,13	16,33	83,55	9,46	0,24	1,83	7,74	-22,87	4,43
P26	371211,3	7751958,2	1184,48	0,42	6,55	34,38	0,16	33,41	66,42	23,61	0,14	1,23	8,48	-23,73	3,85
P27	370923,9	7753012,0	1132,93	0,46	5,94	38,53	7,53	26,21	66,26	23,62	0,20	1,65	8,33	-23,20	4,51
P28	370612,5	7754125,7	-	-	0,43	3,57	4,37	94,86	0,77	1046,38	0,02	0,04	2,42	-25,94	0,35
P29	370253,3	7755191,4	1390,74	0,29	0,64	3,97	9,23	87,51	3,26	1080,99	0,01	0,04	5,56	-25,97	0,17
P30	371938,3	7751306,9	1302,85	0,41	2,15	10,44	4,30	75,70	20,01	697,96	0,06	0,48	8,37	-23,89	1,21
P32	371809,6	7753473,2	1242,89	0,49	0,52	1,21	1,64	97,24	1,13	601,15	0,02	0,07	3,43	-25,84	0,42

Amostra	X	Y	Densidade Superficial (kg/m ³)	Teor de Água (%)	MO (%)	CaCO ₃ (%)	Cascalho (%)	Areia (%)	Lama (%)	D50 (um)	Nitrogênio Total (%)	COT (%)	Razão C/N	Isótopo δ ¹³ C	Isótopo δ ¹⁵ N
P33	370820,3	7755281,2	1477,85	0,40	9,59	7,09	4,64	52,64	42,72	386,79	0,07	0,61	9,19	-24,85	1,38
P34	371402,9	7754556,8	-	-	6,30	22,75	0,03	19,42	80,55	7,74	0,21	1,57	7,41	-22,90	5,23
P35	370241,9	7750732,1	600,74	0,62	6,13	47,33	0,00	14,09	85,91	18,34	0,27	2,16	8,03	-22,77	5,51
P36	369899,0	7751688,1	1024,82	0,53	3,72	42,56	0,02	19,29	80,68	15,88	0,22	1,74	8,02	-22,84	5,46
P37	369412,7	7752850,1	1042,62	0,60	1,01	16,22	6,21	92,88	0,91	537,92	0,02	0,06	3,19	-26,10	0,39
P38	369091,2	7753923,4	973,41	0,56	1,33	8,09	2,44	88,47	9,09	1074,93	0,04	0,22	5,41	-25,14	0,87
P39	368804,0	7754732,7	1379,92	0,38	1,76	28,87	0,00	70,50	29,50	103,44	0,13	1,09	8,41	-24,64	2,73
P40	369070,2	7750826,6	940,63	0,47	6,40	33,92	0,11	32,58	67,31	20,09	0,15	1,16	7,76	-22,84	3,92
P41	368776,3	7751969,6	-	-	0,72	10,20	4,84	94,66	0,51	546,29	0,03	0,06	2,29	-25,98	0,53
P42	368547,7	7752938,5	-	-	2,67	27,97	0,86	5,84	93,30	5,99	0,02	0,07	2,98	-24,47	0,49
P43	368308,2	7754244,8	-	-	0,53	13,34	9,99	88,42	1,59	684,40	0,06	0,35	5,74	-24,03	1,28
P44	367096,8	7755841,3	1327,10	0,39	0,86	5,90	3,46	88,19	8,35	1164,04	0,06	0,60	10,29	-25,07	1,22
P45	368119,2	7756201,2	-	-	0,98	13,02	0,79	98,21	1,00	558,31	0,03	0,14	4,52	-24,27	0,63
P46	369198,8	7756201,2	-	-	0,54	4,54	3,88	92,96	3,16	397,27	0,01	0,07	8,41	-28,37	0,18
P47	369018,9	7756880,1	1302,05	0,52	6,29	17,33	0,00	3,85	96,15	10,89	0,19	1,68	9,08	-23,40	4,98
P48	368389,5	7751185,2	-	-	1,60	49,11	25,88	73,48	0,64	950,74	0,03	2,53	77,44	-1,81	0,69
P49	369209,4	7749872,3	989,90	0,54	4,15	49,90	0,05	60,29	39,65	143,51	0,17	1,33	7,62	-19,86	5,22
P50	368326,1	7750297,6	-	-	1,01	20,08	40,10	59,63	0,28	1691,21	0,03	0,16	5,60	-19,36	0,61
P51	370665,3	7749815,1	879,88	0,63	20,74	27,32	0,00	6,90	93,10	7,66	0,28	1,95	7,05	-22,88	4,21
P52	372268,8	7750527,3	734,47	0,54	4,98	30,99	0,00	20,16	79,84	10,94	0,19	1,50	8,04	-22,93	4,13
P53	373261,7	7751807,4	-	-	0,49	1,31	0,50	97,73	1,77	596,92	0,03	0,10	3,70	-25,97	0,57
P56	373291,0	7752549,2	-	-	1,65	4,27	5,42	88,61	5,96	402,03	0,01	0,08	7,09	-26,51	0,24
P57	372845,0	7754254,5	808,69	0,56	5,63	31,11	0,00	6,02	93,98	16,98	0,24	2,00	8,44	-22,71	4,35
P58	370215,9	7754568,6	1116,13	0,57	0,33	1,60	1,59	96,01	2,40	615,96	0,02	0,09	3,96	-25,82	0,47
P59	366899,3	7752776,3	1068,71	0,59	13,90	16,72	0,00	3,57	96,43	6,87	0,42	5,09	12,21	-23,23	5,00
P60	367632,8	7753483,7	-	-	2,65	19,44	1,75	89,10	9,15	360,49	0,04	0,26	5,98	-25,83	0,92
P61	367521,8	7754095,4	1149,51	0,56	7,79	33,69	0,00	13,52	86,48	21,89	0,21	2,23	10,59	-24,06	5,17
P62	368255,1	7752261,9	-	-	0,82	27,39	2,63	96,73	0,63	410,33	0,03	0,08	3,31	-25,05	0,53
P63	367780,2	7753076,6	1009,37	0,69	5,00	25,34	0,12	48,80	51,08	57,25	0,20	2,31	11,38	-23,95	4,46
PP01	362353,0	7760388,0	1651,53	0,23	0,69	5,81	0,02	99,27	0,71	407,16	0,01	0,44	43,86	-26,45	0,21
PP02	363314,0	7760835,0	1620,30	0,23	2,16	0,62	0,37	98,61	1,02	562,81	0,09	0,96	10,43	-26,85	6,75
PP03	363791,0	7759479,0	969,39	0,66	30,54	11,99	0,00	14,28	85,72	5,81	0,75	10,54	14,00	-26,36	4,59
PP04	363094,0	7757735,0	1428,35	0,35	2,15	0,52	0,79	96,25	2,96	269,80	0,01	1,17	116,79	-26,37	9,19
PP05	363411,0	7756550,0	895,11	0,61	23,96	1,43	0,03	21,18	78,79	7,83	0,81	9,31	11,52	-25,72	5,67
PP06	364233,0	7755839,0	1018,96	0,58	3,24	4,31	8,57	87,95	3,49	341,92	0,01	0,99	98,98	-24,85	6,80

Amostra	X	Y	Densidade Superficial (kg/m ³)	Teor de Água (%)	MO (%)	CaCO ₃ (%)	Cascalho (%)	Areia (%)	Lama (%)	D50 (um)	Nitrogênio Total (%)	COT (%)	Razão C/N	Isótopo δ ¹³ C	Isótopo δ ¹⁵ N
PP07	365546,0	7755512,0	988,18	0,64	9,56	32,15	0,00	37,71	62,29	22,46	0,34	2,93	8,61	-23,08	10,17
P65	359528,4	7757033,0	980,44	0,66	14,83	35,43	27,46	29,63	42,91	103,26	0,38	5,28	14,06	-25,67	14,37
P66	357812,0	7753368,0	1199,64	0,41	6,30	32,09	11,07	63,59	25,34	226,72	0,21	2,64	12,79	-25,03	12,98
P67	358688,1	7751953,4	1015,45	0,45	2,99	10,49	8,84	81,02	10,13	575,76	0,19	2,23	11,54	-24,90	20,65
P68	360878,1	7752295,7	1034,83	0,61	17,23	14,43	0,00	2,51	97,49	5,27	0,42	5,54	13,06	-25,03	8,76
P69	362253,4	7752337,2	1118,11	0,50	8,73	15,72	1,52	83,15	15,32	206,53	0,18	1,95	10,72	-24,82	9,15
P70	363196,2	7752470,5	1163,13	0,40	3,28	36,85	16,67	44,27	39,05	161,38	0,01	1,37	137,29	-25,31	10,20
P71	364353,5	7752571,4	940,07	0,61	11,92	15,77	0,98	15,56	83,46	7,98	0,31	3,42	11,19	-24,35	12,65
P72	365319,0	7752560,0	1026,73	0,63	13,09	17,91	0,01	14,91	85,08	7,59	0,33	3,49	10,44	-24,39	19,56
P73	366284,4	7752294,8	1123,41	0,31	4,12	13,56	3,40	82,36	14,25	170,86	0,01	1,10	110,14	-22,28	12,19
P74	366390,6	7752876,4	-	-	0,67	6,53	0,17	99,34	0,50	352,92	0,01	0,08	7,70	-22,42	0,21
P75	367156,0	7754483,0	852,59	0,64	10,12	21,32	0,00	0,27	99,73	6,39	0,30	2,68	8,94	-23,11	17,98
P76	367622,0	7755403,0	1183,50	0,50	2,20	7,65	1,14	90,79	8,07	284,77	0,01	0,61	60,83	-24,38	7,72
P77	368435,0	7755669,0	-	-	0,54	4,04	0,40	99,45	0,15	395,05	0,01	0,05	4,70	-22,48	4,08
P78	368504,0	7757766,0	-	-	3,62	53,39	0,06	84,89	15,06	81,72	0,01	0,15	15,47	-21,77	8,60
P79	367983,0	7756919,0	-	-	3,76	60,03	0,00	90,03	9,97	78,53	0,01	0,30	30,50	-22,77	7,94
P80	367941,0	7754567,0	-	-	0,29	3,84	0,49	99,44	0,07	458,35	0,01	0,06	5,96	-24,30	0,21
P81	366748,0	7756239,0	-	-	0,49	7,30	0,36	99,27	0,37	479,06	0,01	0,03	3,08	-23,23	0,21
P82	365993,0	7755884,0	-	-	1,71	21,81	0,14	99,03	0,83	355,13	0,01	0,11	11,49	-22,70	6,65
P83	360755,4	7757880,7	993,08	0,57	19,70	11,32	0,22	33,98	65,80	11,47	0,35	5,81	16,75	-25,78	6,67
P84	358632,0	7755492,0	-	-	1,84	22,15	14,92	84,27	0,82	937,08	0,01	1,00	100,03	-24,81	12,58
P85	367120,0	7757174,0	926,71	0,54	2,42	26,25	0,11	85,24	14,65	116,23	0,01	0,32	32,17	-22,69	13,20
P86	367531,0	7756133,0	887,24	0,31	1,83	17,26	0,00	93,63	6,37	215,31	0,01	0,20	19,84	-16,36	0,21
P87	367142,0	7755332,0	-	-	1,98	20,66	0,01	84,37	15,62	128,13	0,01	0,13	13,19	-22,71	10,16
P88	368532,0	7755252,0	-	-	0,52	3,69	0,08	97,34	2,58	281,12	0,01	0,09	8,94	-23,54	0,21
P89	359390,6	7751931,8	-	-	0,80	5,75	6,42	92,84	0,74	857,55	0,01	0,07	6,79	-24,73	0,21
P90	358882,5	7756330,2	938,20	0,53	9,10	18,49	40,68	44,06	15,27	279,05	0,27	3,54	13,12	-25,70	8,14
GERAL	Maior		1651,53	0,69	30,54	60,03	40,68	99,45	99,73	1691,21	0,81	10,54	137,29	-1,81	20,65
	Menor		600,74	0,23	0,29	0,52	0,00	0,27	0,07	4,78	0,01	0,03	2,29	-28,37	0,17
	Mediana		1030,78	0,56	3,76	19,03	0,16	48,80	39,65	103,26	0,15	1,33	8,37	-23,67	4,82
	Desvio		185,41	0,12	5,65	14,11	7,54	38,24	40,18	346,35	0,16	1,81	25,87	2,91	4,43
CANAL DO PORTO	Maior		1202,27	0,69	15,70	50,30	12,51	81,68	99,22	901,03	0,32	2,51	8,88	-21,75	6,02
	Menor		909,17	0,39	1,03	13,14	0,00	0,78	5,81	4,78	0,09	0,69	7,04	-24,42	3,86
	Mediana		1033,27	0,62	8,14	26,60	0,01	5,86	94,14	7,22	0,27	2,06	8,01	-22,41	5,24
	Desvio		79,56	0,07	3,30	10,42	2,72	19,13	21,45	194,79	0,06	0,49	0,54	0,72	0,55

MIXING PROCESS EVALUATION DUE TO SEA LEVEL RISE IN BABITONGA BAY, BRAZIL

Cynara da Nobrega Cunha¹, Anna Carolina Abreu²

ABSTRACT: The Babitonga bay, located in the state of Santa Catarina, Brazil, is an estuarine system of great social and economic importance, that can be highly affected by climate changes effects. These effects include the water level increasing due to Sea Level Rise (SLR) that can be impact the circulation of the bay. In this work, effects in the circulation and mixing processes in the Babitonga bay due to SLR are evaluated. The Water Renewal Rate (WRR) and the Water Age (WA) are used as indicators for the evaluation of the effects. A hydrodynamic model was calibrated and validated for the year 2019, taken as a baseline scenario, and two representative scenarios of SLR due climate change, defined by the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), for the year 2100, were analyzed. WRR and WA were calculated for the Summer and Winter periods for the year 2019, and also for four different projected scenarios for the year 2100. The renovation process is more efficient in the Summer because of the influence of the freshwater discharge. The results showed a reduction in the WRR for the year 2100, and, consequently, an increase in the WA, using the 2019 as the comparison scenario.

Keywords: Babitonga bay, Climate Change, Sea Level Rise, Water Renewal Rate, Water Age.

RESUMO: A baía da Babitonga, localizada no estado de Santa Catarina, Brasil, é um sistema estuarino de grande importância social e econômica, que pode ser afetado pelas mudanças climáticas. Esses efeitos incluem o aumento do nível da água devido ao aumento do nível do mar (SLR) que pode afetar a circulação da baía. Neste trabalho são avaliados os efeitos na circulação e nos processos mistura na baía da Babitonga devido ao SLR. A Taxa de Renovação (TR) e a Idade da Água (IA) são utilizadas como indicadores para avaliar os efeitos. Um modelo hidrodinâmico foi calibrado e validado para o ano de 2019, tomado como cenário base, e dois cenários representativos de SLR devido a mudanças climáticas, definidos pelo Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC), para o ano de 2100, foram analisados. TR e IA foram calculados para os períodos de verão e inverno para o ano de 2019, e também para quatro diferentes cenários projetados para o ano de 2100. O processo de renovação é mais eficiente no verão devido à influência da descarga de água doce. Os resultados mostraram uma redução no TR para o ano de 2100 e, conseqüentemente, um aumento no IA, usando o ano de 2019 como cenário de comparação.

Palavras-chave: Baía da Babitonga, Mudanças Climáticas, Elevação do Nível do Mar, Taxa de Renovação das Águas, Idade da Água.

@ Corresponding author: cynara@ufpr.br

1 Federal University of Paraná

2 Federal University of Paraná Email: annacaa16@gmail.com

1. INTRODUCTION

Babitonga Bay, located on the coast of the state of Santa Catarina, Brazil, forms an environmental complex with extensive mangrove regions, that plays a significant ecological role. Babitonga bay is near the Joinville City, the state biggest city, and is surrounded by other cities (Itapoá and Balneário de Barra do Sul), with an approximately permanent population of 620.000 inhabitants (Figure 1). As it constitutes an important natural breeding place for mollusks, crustaceans, and fishes. The bay has two harbors (São Francisco do Sul and Itapoá) and, due to the industrial development of the area surrounding it, it has been subjected to different environmental impacts, such as the increasing in the organic and industrial pollution (Knie, 2002). Few studies concerned with circulation and interaction between mixing processes and circulation, in Babitonga bay, are found in the literature, see, for instance (Truccolo & Schettini, 2010 and Noernberg *et al.*, 2020). Bearing in mind that coastal areas can be highly affected by the effects of climate change, it must be noted that there are no studies concerned with these effects on circulation and mixing processes in the bay.

According to the IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change - (IPCC, 2014), global climate change can impact coastal regions, favoring an increasing in the water level due to the sea level rise (SLR), changing the rainfall regimes, as a result of intensified extreme weather events, and altering the wind field. According to Oppenheimer *et al.*, 2019, SLR projections indicate a likely rise between 0.29 m and 1.10 m for optimistic and pessimistic scenarios, respectively, by 2100. Among the expected consequences brought by the sea level rise, more frequent inundation in coastal regions, shoreline recession, drastic changes in the hydrodynamic regime in bays and saline intrusion into groundwater (Hu & Deser, 2013; Yin *et al.*, 2017; Befus *et al.*, 2020) must be expected and taken into account. Current studies on climate change in Brazil emphasize the increase in the average global temperature, the influence that deforestation in Amazon rainforest has on the hydrological cycle, and extreme weather events, considering changes in atmospheric circulation (Marengo *et al.*, 2018; Gatti *et al.*, 2021). To address this knowledge gap, even if partially, this study investigates the effect of sea level rise on the mixing processes of bays and estuaries. It is important to consider, in this context, the proper management of these areas and a reliable prediction of the effects brought about by global climate changes, as these regions are extremely susceptible to the impacts resulting from these changes.

Renewal time scale is an important parameter for the quantitative assessment of water renewal on estuaries and bays. The Water Renewal Rate (WRR) and Water Age (WA) are commonly used as the mixing parameters in bays, facilitating the identification of stagnation areas. WRR can be understood as the rate of the water exchanged within a domain of interest, representing how much of the water was renewed in different regions of this domain. The complement of the renewal rate is the percentage of the water not renewed. The WA indicates the average time that the water parcels, for a given position of the domain, remain in that position, as the flow circulates through this domain (Aguilera *et al.*, 2020).

Sea level rise is a worldwide concern, as a high percentage of the population is in coastal areas. Studies that show the impacts of climate change in coastal regions can be found in the literature. Yang *et al.*, 2015, using a hydrological model and a hydrodynamic model applied to the estuary of the Snohomish River, in Washington, USA, investigated the estuarine hydrodynamic response to sea-level rise and change in river flow due to the effect of future climate changes and human development. The results suggest that in the inundated areas the average water depth increases linearly with sea-level rise, but at a slower rate. Prandle & Lane, 2015 investigated how tidally dominated estuaries will adapt to the increasing of the mean sea level and to the changes, associated with global climate change, in river discharges. They developed generic vulnerability Indices to provide indications of relative resilience or sensitivity and applied them to 96 estuaries in England and Wales. The results suggest that a mean sea level rise of 1 m will have little effect on mass transport but will have significant impacts on energy dissipation levels, especially in depths less than 10 m, small impacts on levels of vertical mixing in deeper estuaries, but a significant impact in shallow estuaries. Polli *et al.*, 2020 evaluated the effects on the circulation of the Paranaguá Estuarine Complex (PEC), caused by wind, freshwater flow, and sea level rise due to climate change for the year 2050. A harmonic analysis showed that the diurnal harmonics are amplified and that the higher increase occurs in the internal regions of the PEC.

Babitonga Bay will be impacted by the sea level rise due to climate changes, and the major consequences will be the increase of the salinity intrusion length, the increase in flooding area and alterations on the circulation and the mixing processes. The main purpose of this work is to evaluate the response of the Babitonga bay to the sea level rise due climate changes from the point of view of the mixing processes. With this aim, a

hydrodynamic model was calibrated and validated for the year 2019. Then, two simulations were carried out for year 2100, for different sea level rise scenarios, as projected by the IPCC. As changes in sea level inevitably alter the hydrodynamics, a comparative study was developed to show how the sea level rise will modify the internal circulation, the water renewal rate and the water age of the estuarine region, between the baseline year, 2019, and the year 2100. This study aims to address the following questions: (1) What forcings influence the mixing processes? (2) How does sea level rise influence mixing processes? (3) Which regions of Babitonga bay will be affected by the sea level rise?

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study area

Babitonga bay is located at Southern Brazil, longitude 46.67° W and latitude 26.26° S (Figure 1), with an area of 160 km^2 , extending 30 km from SE to NW, forming one elongated and narrow axis, and its central channel, with about 24 km, is oriented to NE/SW. Figure 2b present Babitonga bay's bathymetry, with mean depth varying from 5.7 m up to 27 m, in the main channel, and less than 5 m in most of the bay. As shown in Figure 2a, the bay is separated from the Atlantic Ocean by one connection. The drainage basin has an area of 1560 km^2 (Paitach *et al.*, 2017). The region is under a Humid Tropical

Climate; with the mean annual precipitation about 2000 mm (Mello *et al.*, 2015). The intense precipitation occurs in the period between October and March, in the austral Summer, which also presents higher temperatures, and the monthly means precipitation is close to 250 mm. In the austral Winter, between April and September, the influence of polar air masses causes a decline of temperature and precipitation, with monthly means less than 100 mm.

The Babitonga bay is dominated by a microtidal regime that presents semidiurnal tide with diurnal inequalities. The main components of astronomical tides are M2 and S2. The longitudinal distribution of salinity is controlled by a combination of tidal effects and freshwater input. According to Noernberg *et al.*, 2020, Babitonga bay has been classified as a weakly stratified estuary with small seasonal variations. The seasonal variation in the freshwater affects the salinities but not enough to change the weakly stratified pattern. In the Summer, especially in the neap tide, the bay condition can change to well mixed during Winter springs, when the fluvial contribution is significantly smaller than it is in the Summer. Indeed, the intratidal and spring-neap cycle is more important in governing the circulation at Babitonga Bay than the seasonal scale. Water temperature and salinity present a seasonal variation – the former varies from 27°C to 32°C in Summer, and between 18°C and 23°C in Winter, and the latter varies from 17 to 27 psu during Summer and, in Winter, between 15 and 28 psu (Noernberg *et al.*, 2020).

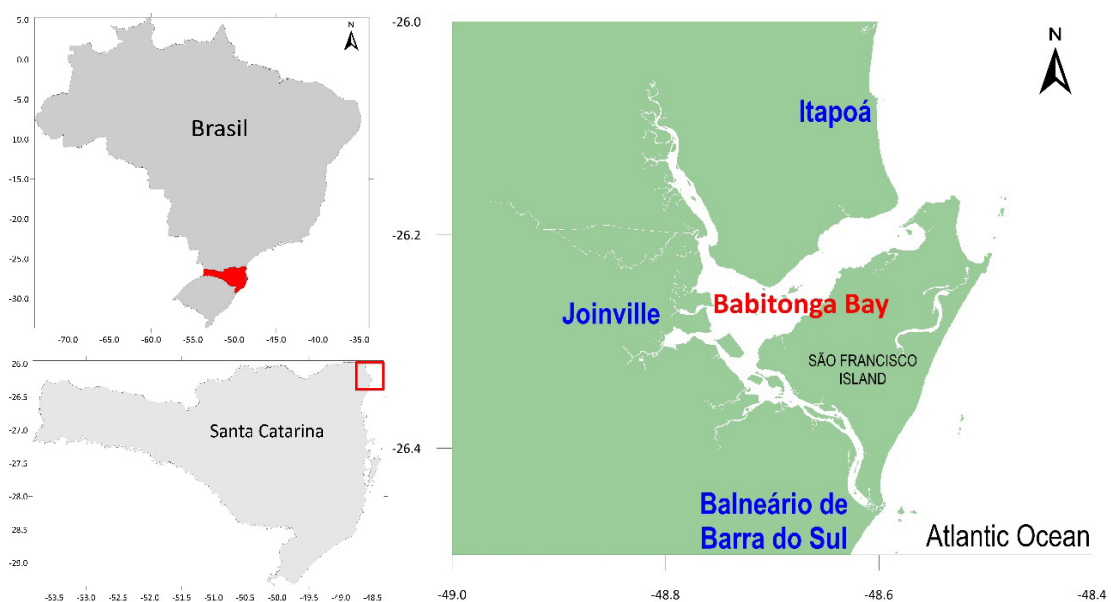


Figure 1. Location of the Babitonga bay.

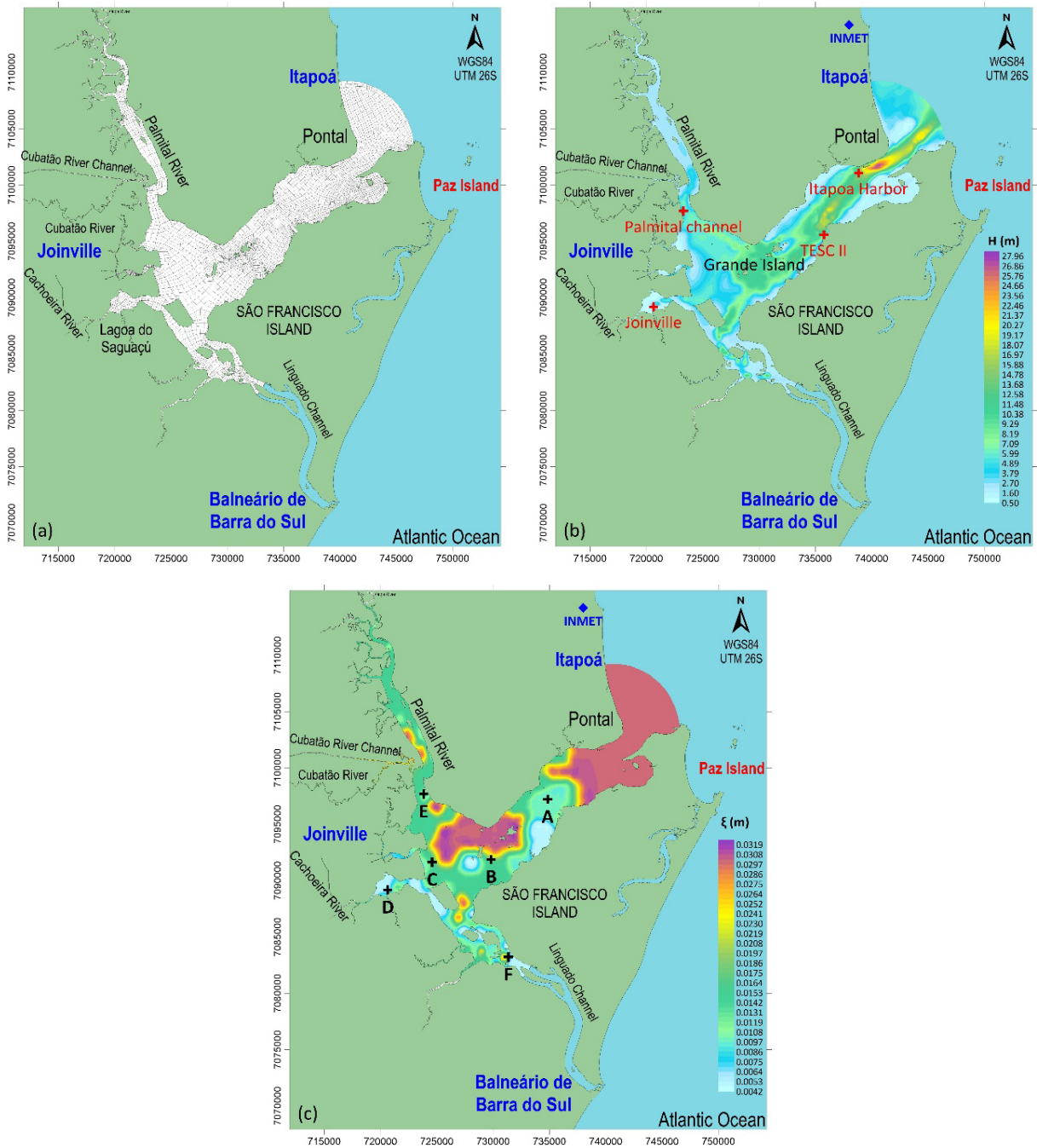


Figure 2. Modelling domain of Babitonga Bay. a) SisBaHIA modeling domain, main rivers and finite element mesh, b) bathymetry and locations of stations where water levels, velocities and wind were measured in 2019 and c) amplitude of the equivalent bottom roughness, ξ , as well as the other monitoring stations, labelled as A-F.

2.2 The hydrodynamic and transport models

The hydrodynamic and transport modelling were performed using the Hydrodynamic Environmental System called SisBaHiA® (Portuguese acronym for Base System of Environmental Hydrodynamics). For more information, the interested reader is referred to Rosmanm, 2021 and www.SisBaHiA.coppe.ufrj.br.

Two models were used in this work: the hydrodynamics model, used to simulate the Babitonga bay hydrodynamics, and the transport model, used to analyse the water renewal, i.e., WRR and WA.

The transport model uses an Eulerian approach for non-conservative parameters, which permits the analyses of parcels of water at different locations over time, to obtain the time evolution of the renewal rates at different points of the study domain. The transport model also uses the same spatial grid applied for the hydrodynamics model and allows for the use of different time step lengths in the analyses. The advantage of coupling the two models, as in the current work, appears in the determination of the velocities and turbulence coefficients, which is done previously in the hydrodynamic model, and that can be used directly in the transport model (Rosman, 2021).

WRR was calculated for simulating the transport of a conservative constituent along the domain by advection and diffusion processes. At the initial moment, 0 % WRR was assigned to all the waters inside the domain of interest, i.e., the conservative constituent concentrations are assumed to be equal to zero. As for the waters entering the domain by the open boundaries or through other inflows, such as rivers, they have a reference value equal to 100%, meaning that the conservative constituent concentrations are equal to 100. Thus, new water with 100% reference value is mixed with initial water of 0% reference value and an intermediary value is computed, indicating the percentage of mixing at any given point in time (Aguilera *et al.*, 2020). The values resulting from these simulations represent the percentage of the mixing of new and old waters in each position of interest.

In this work, the decay of an age-marker passive substance presented in water, is estimated as the WA. For this being possible, it is necessary that this age-marker substance has a first-order decay kinetic reaction with a constant and positive decay rate, and that other effects of loss or gain in mass are not taken into account. Thus, it is assumed that a uniform well-mixed volume of water in the whole domain has an initial concentration of the age-marker substance equal to 1.0. Consequently, the

WA is zero. The new waters that enter the domain by the open boundaries or through other inflows have WA equal zero, i.e., the concentrations of the age-marker substance are equal to 1.0. As the initial waters and the new waters, both with WA = 0, were mixed and transported through the domain, and the concentration of the substance will decrease due to the decay process, consequently, the WA value will become different at each point because it depends on the magnitude of the currents and on the turbulence at each location (Aguilera *et al.*, 2020 and Rosman, 2021).

2.3 Setup of calibration and validation of the hydrodynamic model

The calibration and validation of the hydrodynamic model were performed for the year 2019. The calibration period was performed between 01/12/2019 and 03/12/2019, in Summer, and the validation period carried out between 05/01/2019 and 06/30/2019, in Winter. During these periods, water levels were measured (tidal elevation) by the Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) at four stations: Paz Island, Itapoá Harbor, TESC II and Joinville (Figure 2b), with measurements collected at 15-minute intervals. Water levels measured at Paz Island station were used as an ocean open boundary condition and data measured at Itapoá Harbor, TESC II and Joinville stations were compared with the ones furnished by the model (the sites are identified in Figure 2b). Figure 3 shows the tide curves between January 12th- March 12th and May 1st- June 30th. The Babitonga bay exhibits a semidiurnal tidal regime, with maximum ranges of 1.78 m and 1.60 m and maximum tide heights of 1.98 m and 1.80m, in Summer and Winter, respectively. In the Summer, the storm surges were observed between 01/19/2019 and 01/21/2019, 02/03/2019 and 02/06/2019, 02/11/2019 and 02/15/2019. During the calibration (Summer 2019) and validation (Winter 2019) periods, Noernberg *et al.*, 2020 carried out measurements of North-South and East-West components of the current at Palmital channel (the site is identified in Figure 2b), between 01/25/2019 and 02/10/2019, and 06/19/2019 and 06/30/2019. For current measurements, an ADCP (Acoustic Doppler Current Profile) anchored at 5.0 m depth was used in both Summer and Winter periods, with values recorded at every 15 minutes.

The mesh consists of 1455 sub-parametric Lagrangian quadrilaterals elements, 6669 nodes, available from baidobrasil.coppe.ufrj.br is shown in Figure 2a. The bathymetry of the Babitonga Bay - mean depth is 5 m, was

obtained through nautical charts from DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação, in English: Directorate for Hydrography and Navigation) number 1804 (scale 1: 27,000) and studies carried out in the region with the collaboration of EPAGRI, shown in Figure 2b. The bottom friction coefficient depends on the amplitude of the equivalent bottom roughness (ξ) defined from the composition and distribution of bottom sediments. Babitonga bay is characterized by the predominance of fine and medium sand ($\xi < 0.030$ m); but coarse sand banks ($\xi > 0.035$ m) can be found at the entrance and, in an inner region of the bay and near the mouth of the rivers, silt ($\xi < 0.02$ m) predominates (Figure 2c). The time interval used in the hydrodynamic circulation simulations was 60 seconds, which corresponds to an average Courant number equal to 5.6.

There is no accurate information concerning the discharges data of the contributing rivers of Babitonga bay in the literature (Noenberg *et al.*, 2020). For the calculation of river discharges for the year 2019, using the Rational method. With the data of areas, slopes, axial length of rivers and monthly rainfall data, available from INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, in English: National Institute of Meteorology), it was possible to calculate the average monthly discharges for the Summer and Winter months for each watershed. The largest contributor is the Cubatão River, which represents 33.6% of the total freshwater input into the bay, followed by the Sambaqui, Parati and Três Barras rivers, which together represent 18.8%. It is estimated that the sum of the average monthly discharges in the Summer is approximately $71 \text{ m}^3/\text{s}$, which is about three times greater compared to the Winter, in which is approximately $24 \text{ m}^3/\text{s}$.

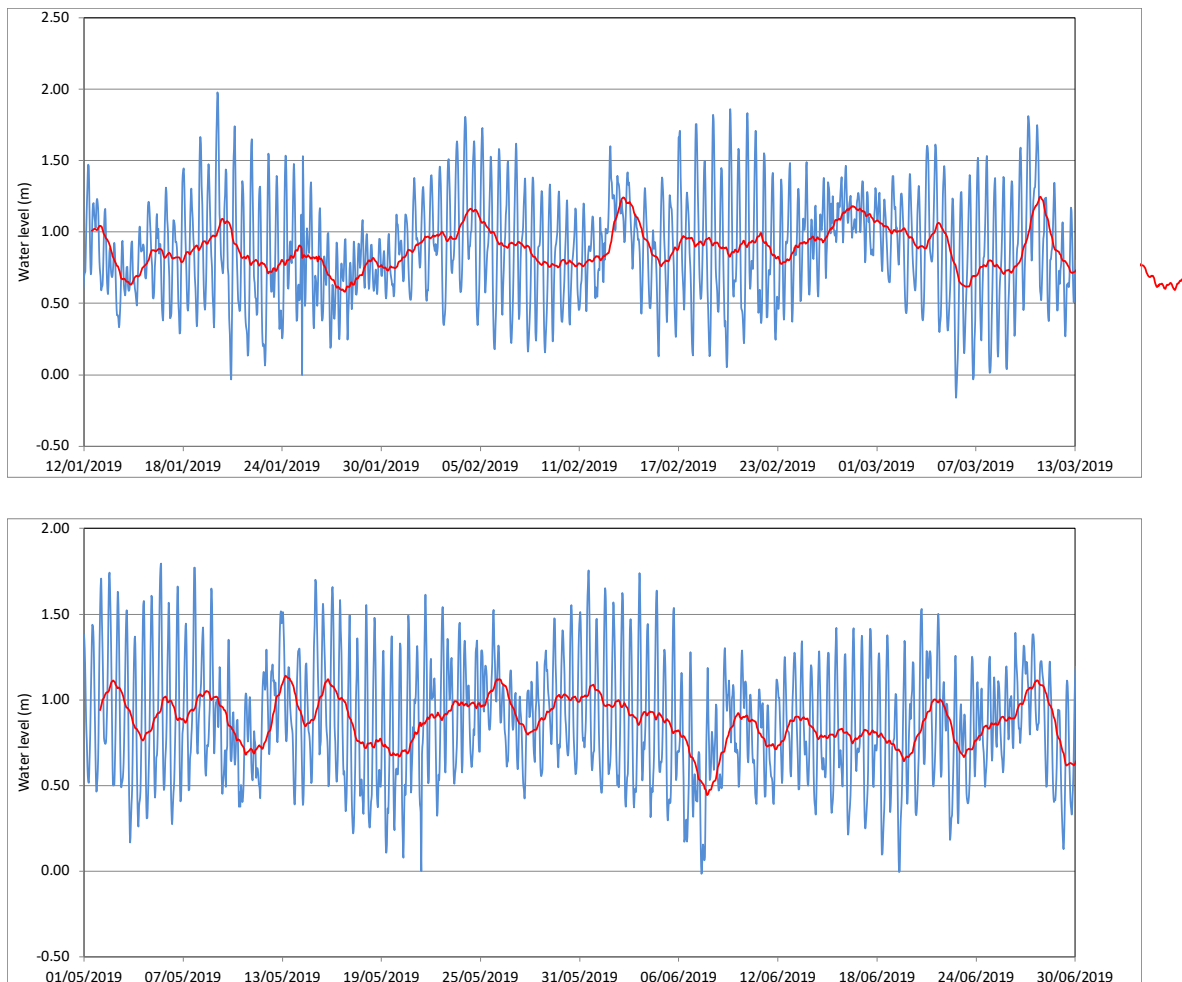


Figure 3. Water level (m) at Paz Island from 12 January to 12 March 2019 and 01 May to 30 June 2019. The red curve corresponds to the 24-hour moving average.

Wind conditions were assumed unsteady but spatially homogeneous. Wind speed and direction were provided by INMET Station (Figure 2b). Figure 4 shows the wind rose for Summer, between January and February 2019, and for the Winter, between May and June 2019. In the Summer, winds from the WSW and ENE are most frequent, about 25% of the time with an average speed of 1.38 m/s (maximum of 5.9 m/s); in the Winter, winds from the WSW and SW are the most frequent, 27% of the time with an average speed of 0.44 m/s (maximum velocity equal to 5.1 m/s). In order to simulate the hydrodynamic circulation, water level (Figure 3), freshwater discharge and wind (Figure 4) from the 2019 data were provided for the two periods.

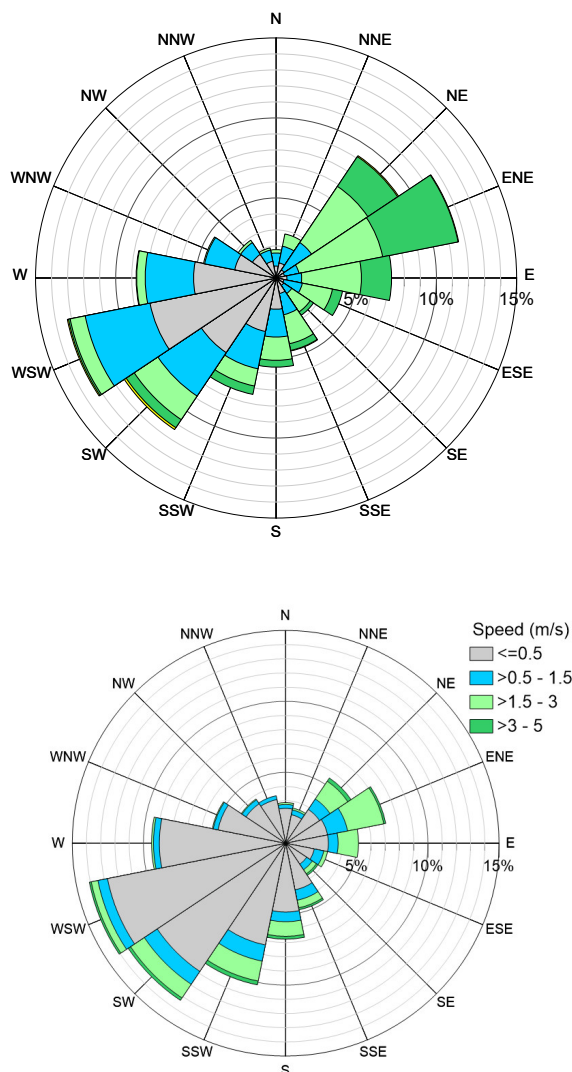


Figure 4. Wind rose for data obtained at INMET station in the Summer (above) and Winter (below) 2019.

2.4 Climate change data set – SLR projections

The year 2019 constitutes the baseline scenario and future scenarios for the year 2100, that can be classified either as middle range/optimistic or as pessimistic, were built considering two Representative Concentration Paths (RCPs), RCP 4.5 and RCP 8.5, from IPCC (Moss *et al.*, 2010). Wind field and river discharges for the two future scenarios are the same used in the calibration and validation simulations. Polli *et al.*, 2021 analyzed variations in the wind field and freshwater due to climate change in the circulation of the Paranaguá Estuarine Complex (CEP), and concluded that the differences in the wind field and freshwater discharge were relatively small for the different IPCC scenarios for year 2050. Considering that CEP and the Babitonga Bay have similar climatic characteristics, it seems reasonable that the wind field and the river discharge data from 2019 could be used in the simulations of future climate change scenarios.

The global projections of the Mean Sea Level (MSL) presented by the IPCC indicate values on a global scale. For the projections on a regional scale and, more specifically, for the region of the Babitonga bay, the values used in this work were generated through projections carried out by the Coastal Modelling System of Brazil (SMC-Brazil). The SMC-Brazil is a set of methodologies and numerical tools that allow for better understanding of coastal systems, as well as a more reliable design of actions on the coast. SMC-Brazil can estimate global and regional sea level rise for IPCC scenarios along the Brazilian coast. The historic sea level rise database includes series of monthly distributions of large-scale sea level variability and changes over the period from 1950 to 2000 for the global ocean. This database is included as a set of series along the Brazilian coast, which are used to estimate sea level trends. The database considers two scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) and two projections (2070 and 2100) (Quetzalcóatl *et al.*, 2019).

After the calibration and validation simulations, called as scenarios C and V, respectively, four simulations for the climate change scenarios, for the year 2100, were performed: RCP 4.5, Summer period, scenario S1; RCP 8.5, Summer period, scenario S2; RCP 4.5, Winter period, scenario S3; RCP 8.5, Winter period, scenario S4. In all six scenarios, the total simulation time was 60 days in the hydrodynamic circulation. In the S1, S2, S3 and S4 scenarios, mesh, bathymetry, bottom roughness, wind data and river discharges, corresponding to Summer and Winter periods of 2019 were used, with only the open boundary condition being altered.

Sea level risings equal to 67 cm and 86 cm were prescribed, respectively, for S1 and S2, and for S3 and S4 scenarios. Then, these prescribed values are added to the tidal curves measured for the Summer and Winter periods of 2019. Then, the Eulerian transport model were applied for the above mentioned six hydrodynamic scenarios, for 230 days, accounting approximately for 3.0 cycles of hydrodynamic circulation.

3. RESULTS

3.1 Calibration and validation of the hydrodynamic model

The calibration and validation of the hydrodynamic model were performed for the year 2019. Figure 5 shows the simulated water level vs. the field data for the three monitoring stations – Itapoá Harbor, TESC II and Joinville during calibration period, scenario C. The model showed excellent agreement with the phase and the amplitude. The calculated statistical parameters

show that the measured data were accurately reproduced by the model. The correlation coefficients (R^2) are close to 1.0: 0.9712, 0.9529 and 0.9471 for Itapoá Harbour, TESC II and Joinville stations, respectively. Mean Absolute Errors (MAE) were calculated and show deviations of less than 0.161 m, also an excellent result. The results for Itapoá Harbour, TESC II and Joinville were 0.062 m, 0.080 m and 0.161 m, respectively. The Root Mean Square Errors (RMSE) were 0.085 m, 0.123 m and 0.130 m for Itapoá Harbour, TESC II and Joinville, respectively. It is possible to observe that the Joinville station, in the shallowest region from the three monitoring stations evaluated, presents the worst adjustment. This behaviour is common in the inner regions of the bays due to the presence of shallower regions. Therefore, at this station, the adjustment is worse due to the tidal wave amplification processes. These processes are strongly influenced by bathymetry; however, the bathymetry of the Saguacu lagoon, used in the modelling, is outdated, and its impact on the results should be considered with caution.

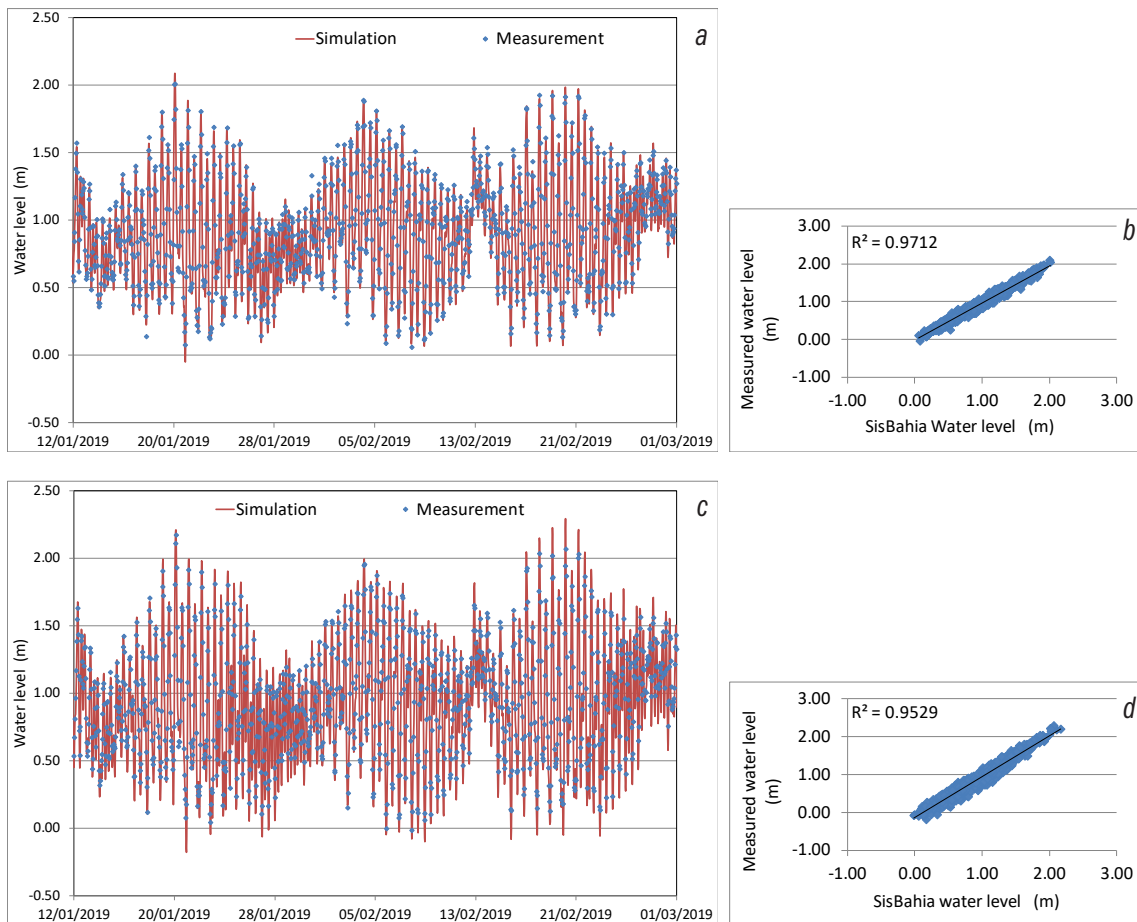


Figure 5. Water level simulated vs. field data at: a) Itapoá Harbor, c) TESC II, and e) Joinville stations, during calibration period, scenario C. Measured and simulated water elevation dispersion diagram at: b) Itapoá Harbor, d) TESC II, and f) Joinville.

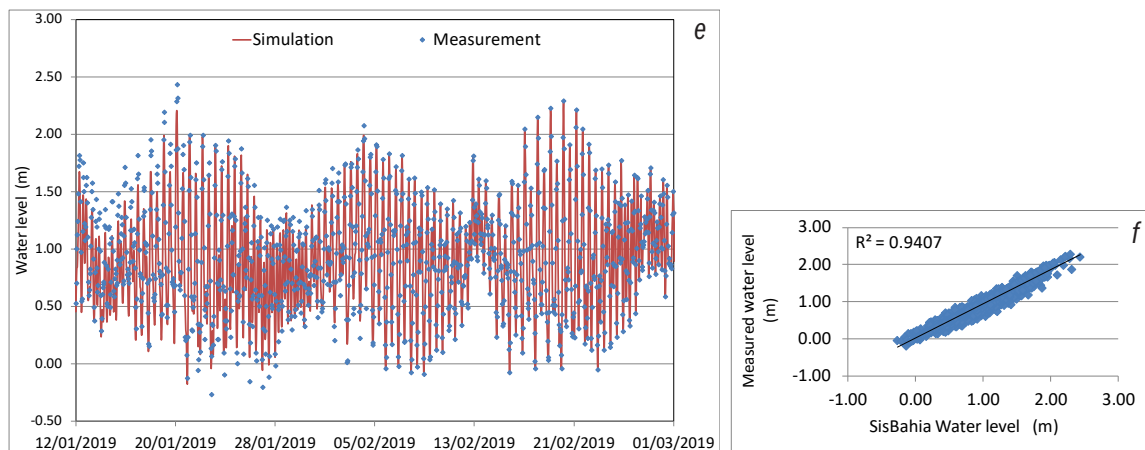


Figure 5 (continuation). Water level simulated vs. field data at: a) Itapoá Harbor, c) TESC II, and e) Joinville stations, during calibration period, scenario C. Measured and simulated water elevation dispersion diagram at: b) Itapoá Harbor, d) TESC II, and f) Joinville.

Figure 6 shows the comparison between the measured data, measured data filtered at 4 hours and the results calculated by SisBaHiA[®] for the North-South (NS) and East-West (EW) components of the current for the Summer period. The comparison between the simulated vs. field data for the NS component showed a good adjustment in what concerns the phase. At high water spring, the values obtained by the model are amplified relatively to the measured data filtered. The same behaviour can be observed in relation to the EW component of the current. The values of the RMSE, MAE and R^2 can be considered acceptable for NS component. The R^2 is 0.6770, indicating a good correlation, MAE is 0.149 m/s and RMSE is 0.183 m/s. It is worth mentioning that the loss of the model quality, for the EW component, is probably due to the inconsistency of the bathymetric data for the region ($R^2=0.4512$, MAE=0.065 m/s, and RMSE = 0.080 m/s).

Figure 7 shows the water level elevation for the three monitoring stations during the validation period. The model showed excellent agreement with the phase and amplitude, with R^2 equal to 0.9779, 0.9698 and 0.9176. MAE was also calculated, and the results are: 0.065 m, 0.086 m, and 0.183 m; RMSE are: 0.081 m, 0.098 m and 0.269 m. Figure 8 shows the results obtained by the model during validation periods for the North-South (NS) and East-West (EW) components of the current. The R^2 are above 0.670, with a greater RMSE equal to 0.151 m/s, and with MAE smaller than 0.126 m/s.

3.2 Water renewal rate and water age: current and future scenarios

Six stations, labelled as A, B, C, D, E and F, were established (locations shown in Figure 1c), with the aim of characterizing the different compartments of Babitonga Bay. WRR and WA were calculated for the following scenarios: C, V, S1, S2, S3 and S4. After 230 days of simulation, all the stations reached the equilibrium. In natural flows, the equilibrium is dynamic, and, after enough time of simulation has elapsed, the WRR fluctuates around a value, depending on the hydrodynamic forcings, such as tides or river flows, for example.

Figure 9 shows the temporal evolution of the WRR in the six stations, for Summer period. Stations A and E showed the greatest oscillations. The oscillations observed at station A are due to the tidal effect, while in station E they are influenced by the river flows. The WRR's difference between the scenarios is small at station A, considering that the region is close to the ocean boundary, with little influence from the river flows. It is also possible to observe that the fluvial flow is an important forcing in the renewal process in the regions close to the tributaries, promoting a significant increase in the WRR's, as occurs in Saguauçu Lagoon (station D). The differences between the WRR's considering climate change (scenarios S1 and S2) and the current situation (scenario C) are minimal in the Summer, which shows the great influence of river flows on the water renewal process. However, the waters are renewed more slowly in the S2 scenario for all the stations.

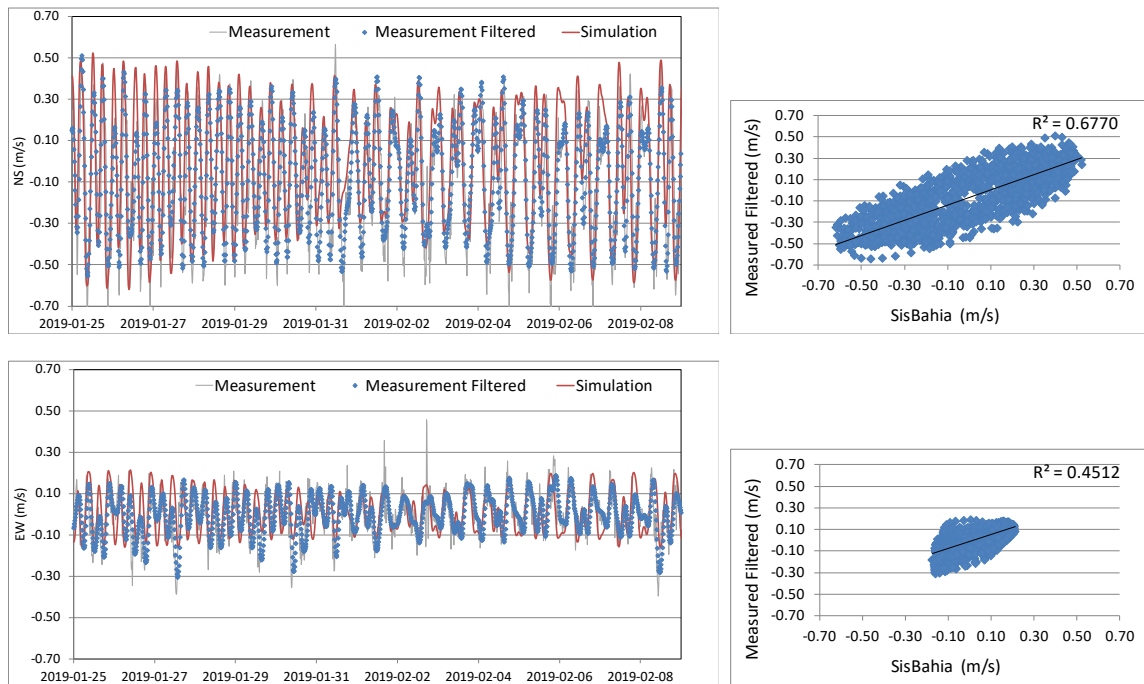


Figure 6. NS and EW components of the current simulated vs. field data and dispersion diagram at Palmital Channel station during calibration period, scenario C.

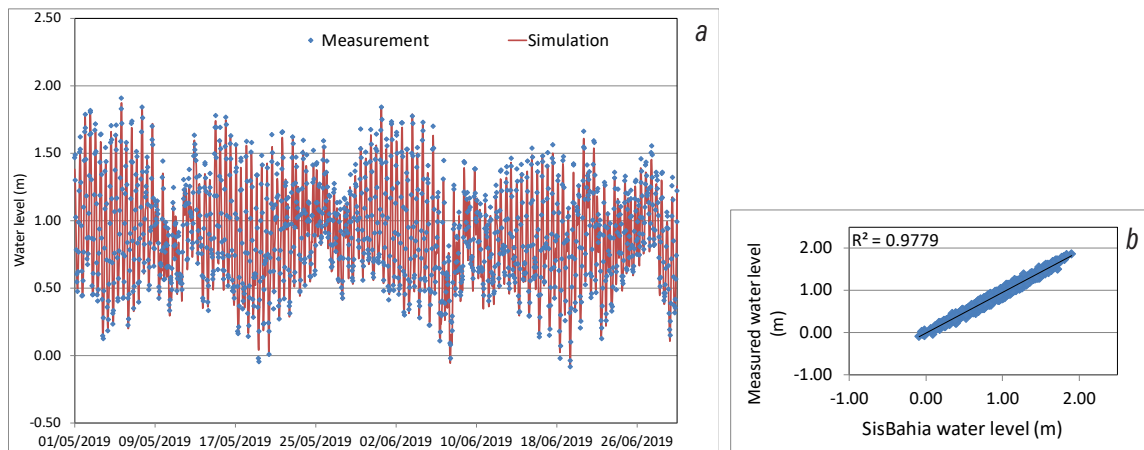


Figure 7. Water level simulated vs. field data at a) Itapoá Harbor, c) TESC II and e) Joinville stations during validation period, scenario V. Measured and simulated elevation dispersion at a) Itapoá Harbor, c) TESC II e) Joinville.

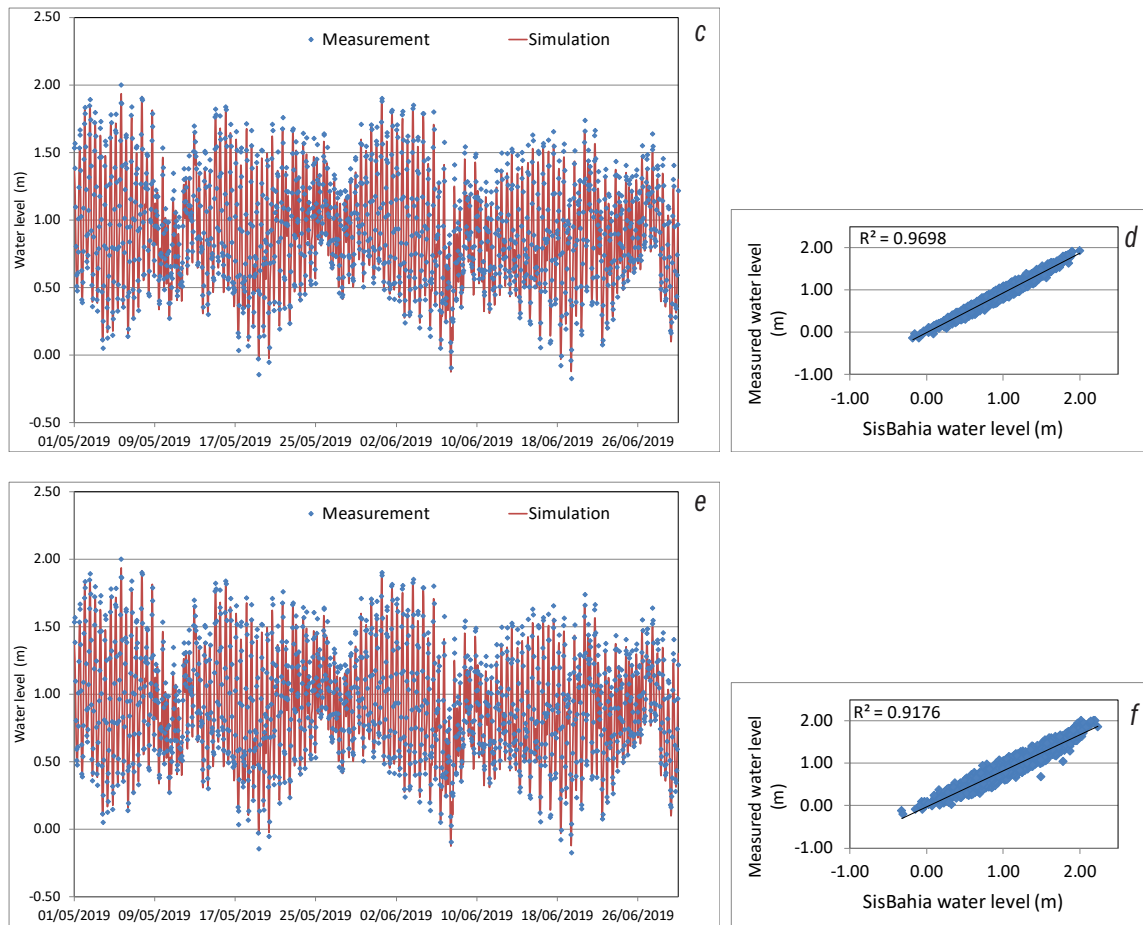


Figure 7 (continuation). Water level simulated vs. field data at a) Itapoá Harbor, c) TESC II and e) Joinville stations during validation period, scenario V. Measured and simulated elevation dispersion at a) Itapoá Harbor, c) TESC II e) Joinville.

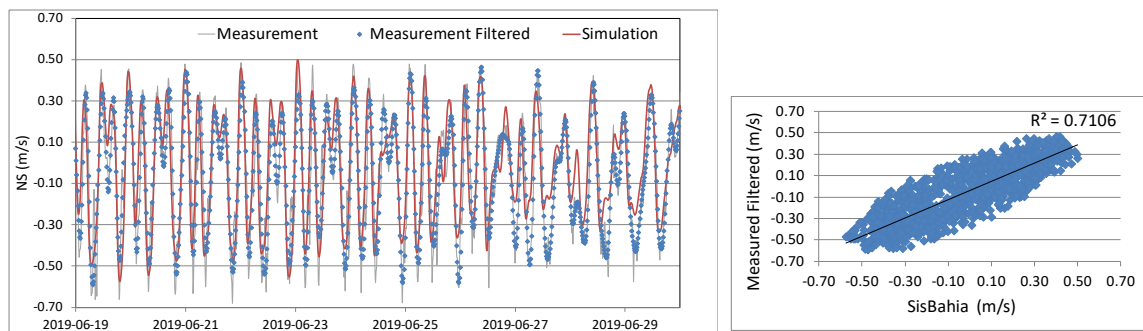


Figure 8. NS and EW components of the current simulated vs. field data and dispersion diagram at Palmital Channel station during validation period, scenario V.

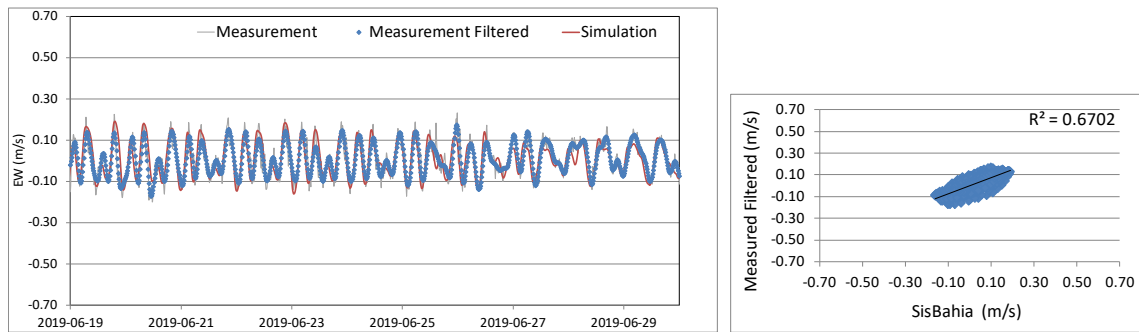


Figure 8 (continuation). NS and EW components of the current simulated vs. field data and dispersion diagram at Palmital Channel station during validation period, scenario V.

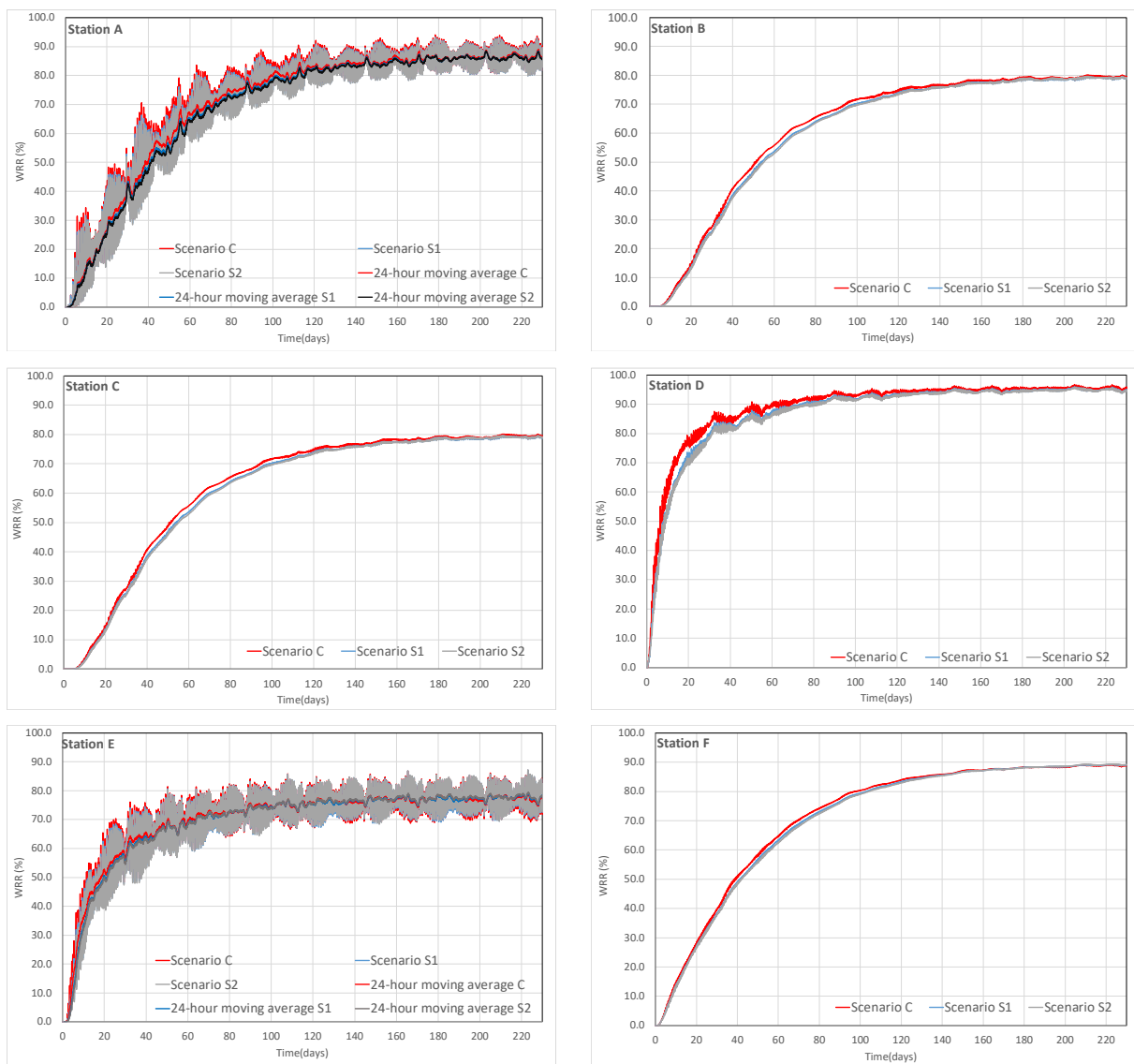


Figure 9. Water Renewal Rates in scenarios C (2019), S1 (2100 RCP 4.5), and S2 (2100 RCP 8.5) at the stations A, B, C, D, E and F.

Figure 10 shows the temporal evolution of the WRR's for Winter scenarios. As for the representative Summer scenarios, the waters are renewed more slowly in the S4 scenario, which is the most pessimistic scenario of climate change. Despite the differences between S3 and S4 scenarios be smaller than the differences between the S1 and S2 scenarios, because the river flows are significantly lower in the Winter than are in the Summer, it can be stated that the river flow remains important in the process of water renewal. For scenarios S3 and S4, considering the sea level rise, there is a reduction in the WRR, the difference

between S3 and S4 being more significant than the difference between S1 and S2. The WA is inversely proportional to the WRR, so it will present a more significant increase for the scenarios that correspond to the Winter period.

Figure 11 presents of isolines of WA's for the scenarios V, S3 and S4 at the end of the simulation. Considering that in the Winter the fluvial contribution is small, the results clearly show the influence of river flows in the Saguauçu Lagoon (station D), and the influence of tides in the northeast part (station A); at station D, the WA values double from Summer to Winter.

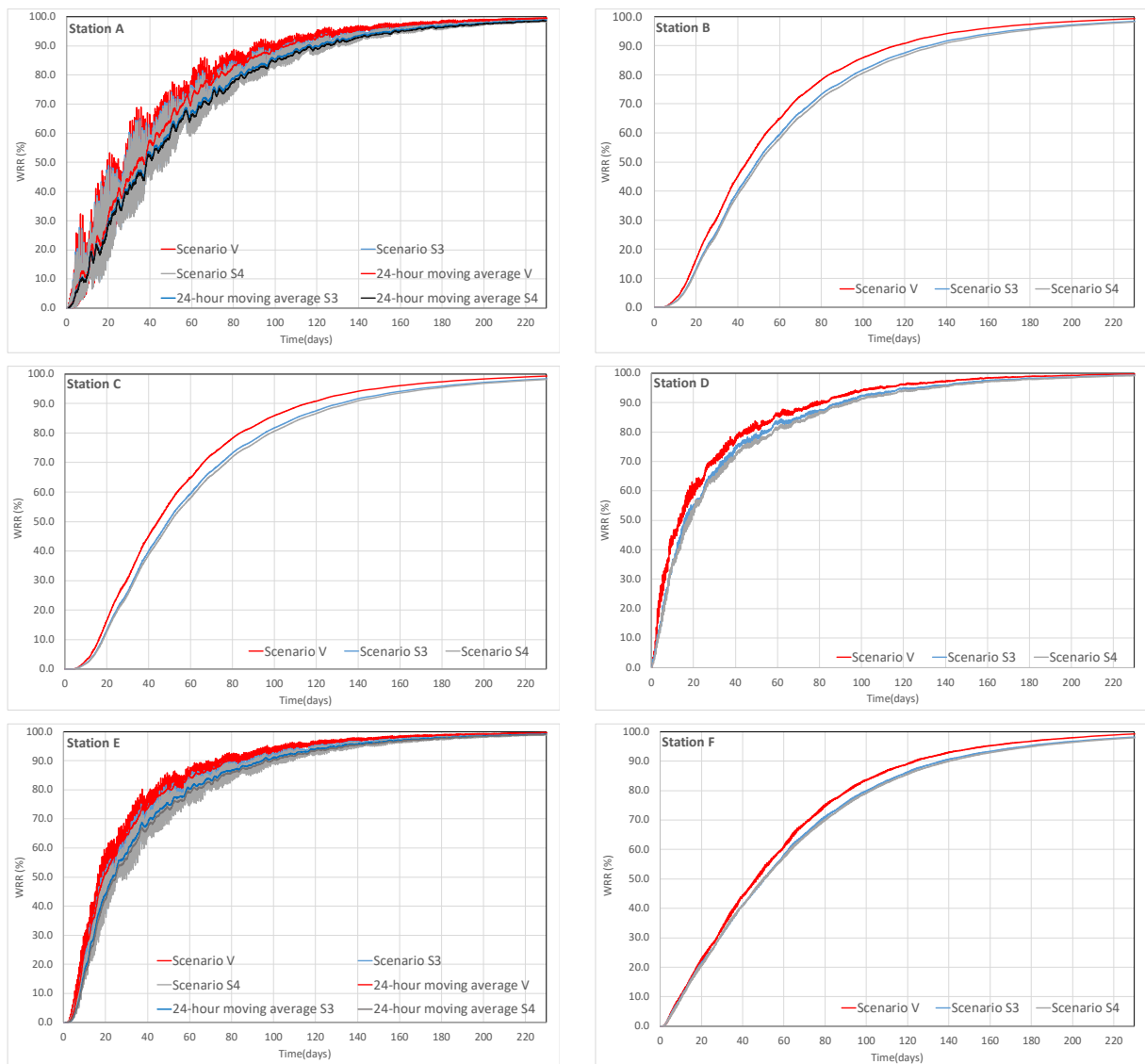


Figure 10. Water Renewal Rates in the scenarios V (2019), S3 (2100 RCP 4.5) and S4 (2100 RCP 8.5) at the stations A, B, C, D, E and F.

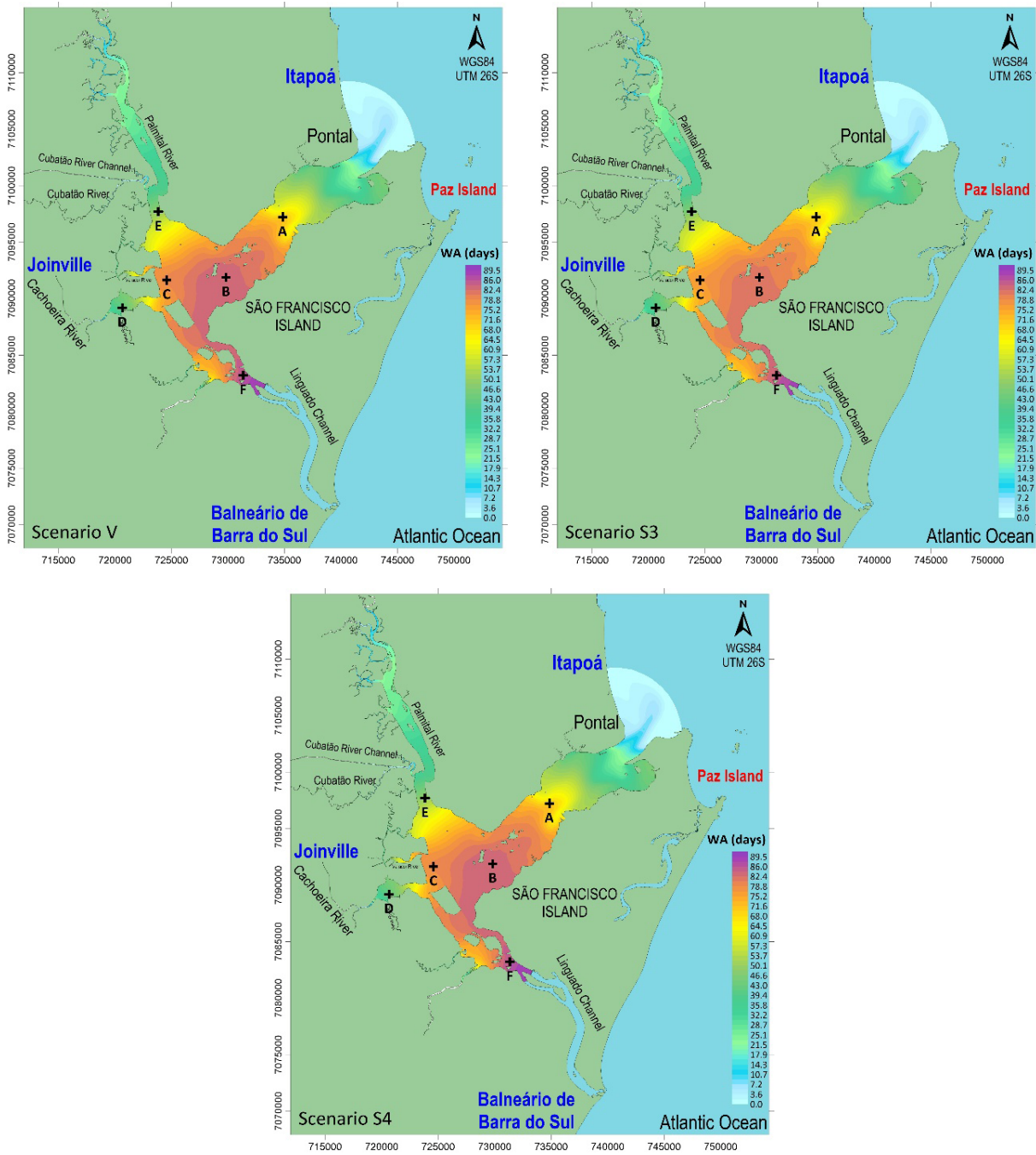


Figure 11. Map of isolines of Water Ages at the end of the simulation for the scenarios V (Winter 2019), S3 (Winter 2100, RCP 4.5) and S4 (Winter 2100, RCP 8.5).

4. DISCUSSION

The results of the hydrodynamic model indicate that in both periods, Summer and Winter, a good agreement between simulated and measured data were observed. However, the results showed good phase agreement, but with amplified values for the NS and EW components in relation to the measured data filtered. As the data were measured in a shallow and narrow channel, where the bathymetry and the width can be very irregular, deviations in the direction of the currents can be caused by the smoothing of the bathymetry, artificially introduced by the model, and also by the small local irregularities, that are not properly taken into account by the model. The Palmital channel is close to the Cubatão river mouth and, certainly, the currents are influenced by the river discharge, which is greater in the Summer, the calibration period, than it is in the Winter, the validation period. As the discharges imposed in the model are permanent for both periods, variations in discharge data can also influence the measurements and were not considered by the model.

One of the consequences of sea level rise, caused by the climate changes, is the possibility of flooding in coastal regions, as well as in internal regions of the bays and lagoons. Bearing this in mind, it was possible to calculate, for each scenario, the maximum water level in the different stations, considering the Summer and Winter periods (year 2019), for the year 2100, scenarios S1, S2, S3 and S3 (Table 1). At Joinville station, the predicted maximum water level increase was 0.71 m, for 2100 RCP 4.5 scenario, when compared to 2019, showing how much the level variations can impact the internal and shallow regions of the bay; in the most pessimistic scenario (RCP 8.5), this variation of the maximum water level is even greater, 0.89 m being the computed value. The same behavior can be observed in the other stations, with significant differences when comparing the years 2019 and 2100.

Water renewal rate and water age

At the Cubatão river mouth (station E), the main contributing river in the bay, the differences between WRR values for the different scenarios are also small: there, the variation in mean sea level is not very relevant when compared to the fluvial flow. At stations B, C, D and F, there is a slight deceleration in the renewal process for scenarios S1 and S2, which may be caused by the set-up on the free surface in the bay. It is also observed that the central part of the bay (station B), the region at the exit of Saguacú Lagoon (station C), and the region close to the

Linguado channel (station F) present renewal processes slower than in the other areas, a condition that is slightly accentuated with the sea level rise, which indicates the possibility of these areas being under the effect of set-up.

Table 1. Maximum Water Level (MWL) and difference between MWL for different scenarios at Itapoá Harbour, TESC I and Joinville stations.

	Itapoá Harbour	TESC I	Joinville
MWL 2019(m)	2.06	2.10	2.21
MWL 2100, RCP 4.5 (m)	2.75	2.80	2.92
MWL 2100, RCP 8.5 (m)	2.93	2.98	3.10
Differences between MWL 2019 and 2020, RCP 4.5 (m)	0.69	0.70	0.71
Differences between MWL 2019 and 2020, RCP 8.5 (m)	0.87	0.88	0.89

Table 2 presents the values of WA's for all scenarios at the end of the simulation. In Summer, water renewal is more efficient for the scenario C. However, there is a worsening in the renewal capacity due to the climate change, with a significant fall considering the S4 scenario. Stations B, C and F represent the most critical regions, with the highest Water Age, with Station F having the worst WA, 85.5 days. The lowest WA was obtained for the Summer period of the year 2019 (scenario C), at station D.

It is possible to observe a more directly influence of the fluvial flows over the water exchange process in the inner compartments of the bay. In other regions of the bay, the difference in WA between the different scenarios is minimal, indicating that changes in river flows do not cause great differences in the process of water renewal in these regions. During summer, water ages are less than 70 days; in the winter, the values are higher.

Observing the results of isolines of Water Ages obtained by SisBaHiA®, two possible stagnation areas were identified, which presented lower renewal rates and higher water ages when compared to the other regions: the central part of the bay, the region close to Grande Island, and the Linguado channel. In this sense, it is possible to state that these areas are more prone to stagnation.

Table 2. Water Ages (days) at the stations A, B, C, D, E and F for different scenarios, with emphasis on the highest and lowest value of the age.

Stations	Scenarios					
	C	S1	S2	V	S3	S4
A	55.4	57.2	57.7	63.8	68.7	70.1
B	67.9	69.9	70.5	72.9	80.7	82.8
C	57.6	60.7	61.4	66.9	76.6	79.1
D	16.9	20.5	21.2	32.9	39.0	41.9
E	41.6	42.8	43.0	39.5	46.7	48.6
F	50.7	52.0	52.6	78.7	84.7	85.8

In the region close to Grande Island, the mixing processes should be studied in detail, as this region presents a low rate of renewal when compared to other regions of the bay. This region, which can be identified as the turbidity maximum zone (TMZ) of the system, with the formation of possible areas of stagnation, has the lowest renewal rates. Comparing the results of the 2019 scenario with the 2100 scenarios, it is possible to verify an increasing in these stagnation regions, indicating the zone of maximum turbidity.

5. CONCLUSIONS

With the definition of mixing parameters or renewal indicators (WRR and WA), it was possible to observe the areas of greatest stagnation, critical points that should be the focus of attention in future studies and projects to be carried out in Babitonga Bay. The regions that deserve attention are Linguado channel and those close to the Grande Island. It was also verified that the regions close to the river's mouth present the best renewal rates and the lowest water age: such are the regions close to the Saguacu lagoon and to the Palmital Channel.

The Linguado channel's region, identified as one of the most critical regions in relation to mixing processes, due to the little influence of river flows, is where the worst mixing rates occur, which possibly affects the water quality. The reopening of the channel has been the focus of studies and projects, which should be better evaluated mainly due to the projection of future scenarios with the sea level rise, which could further reduce the renewal rate in the region.

It is possible to compare the mixing parameters between the different simulated scenarios. The main evidence is that there is a reduction in the WRR for the year 2100, in both scenarios

and, consequently, an increase in the WA as the mean sea level is modified. For the WA, there was an average variation for the 2100 scenarios with RCP 4.5 and 8.5, compared to the year 2019, of 2.71 days for the Summer and 8.93 days for Winter. These scenarios of reduced mixing parameters are intensified for the Winter, as a consequence of the lower river flows in this period.

ACKNOWLEDGES

This study was financed in part by the *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001*. The authors would like to thank Prof. Mauricio Noernberg (UFPR) to provide the current data and EPAGRI/CIRAM for the water level data.

REFERENCES

- Aguilera, L.; Santos, A. L. F.; Rosman, P. C. C. (2020) - On characteristic hydraulic times through hydrodynamic modelling: discussion and application in Patos Lagoon (RS). *Rev. Ambiente Água*, 15: e2456. DOI:10.4136/ambi-agua.2456.
- Befus, K.; Barnard, P.; Hoover, D.; Hart, J.; Voss, C. (2020) - Increasing threat of coastal groundwater hazards from sea-level rise in California. *Nature Climate Change*, 10: 1–7. DOI: 10.1038/s41558-020-0874-1.
- Epagri/IBGE (2004) - *Mapoteca Topográfica Digital de Santa Catarina: Termo de Cooperação Epagri/IBGE*. Available on-line at <https://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca>. (accessed 13 April 2022).
- Gatti, L.V.; Basso, L.S.; Miller, J.B.; et al. (2021) - Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595: 388–393. DOI: 10.1038/s41586-021-03629-6
- Hu, A.; Deser, C. (2013) - Uncertainty in future regional sea level rise due to internal climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 40: 2768–2772. DOI:10.1002/grl.50531.
- IPCC. (2014) - *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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1132 pp.
- Knie, J. L. W. (2002) *Atlas Ambiental da Região de Joinville: Complexo Hídrico da Baía da Babitonga*. FATMA/GTZ, Florianópolis, 187 p. (in Portuguese).
- Marengo, J. A.; Souza, C. M.; Thonicke, K.; Burton, C.; Halladay, K.; Betts, R. A.; Alves, L. M.; Soares, W. R. (2018) - Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Frontiers in Earth Science*, 6. DOI: 10.3389/feart.2018.00228.

- Mello, Y. R. de; Kohls, W.; Oliveira, T. (2015) - Analysis of monthly rainfall probable to municipality of Joinville (Sc) and region. *Revista Brasileira de Climatologia*, 17: 246-258. DOI: 10.5380/abclima.v17i0.42975.
- Moss, R.H.; Edmonds, J.A.; Hibbard, K.A.; Manning, M.R.; Rose, S.K.; van Vuuren, D.P.; Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G.A.; Mitchell, J.F.B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, R.J.; Thomson, A.M.; Weyant, J.P.; Wilbanks, T.J. (2010) - The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: 747-756. DOI: 10.1038/nature08823
- Noernberg, M. A.; Rodrigo, P. A; Luersen, D. M. (2020) - Seasonal and fortnightly variability of the hydrodynamic regime at Babitonga Bay, Southern of Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 40: 101518. DOI: 10.1016/j.rsma.2020.101518.
- Oppenheimer, M.; Glavovic, B.; Hinkel, J.; van de Wal, R.; Magnan, A. K.; Abd-Elgawad, A.; Cai, R.; Cifuentes-Jara, M.; Deconto, R.M.; Ghosh, T.; Hay, J.; Isla, F.; Marzeion, B.; Meyssignac, B.; Sebesvari, Z. (2019) *Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities*; IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- Paitach, R. L.; Simões-lobes, P. C.; Cremer, M. J. (2017) - Tidal and seasonal influences in dolphin habitat use in a southern Brazilian estuary. *Scientia Marina*, 81: 49-56. DOI: 10.3989/scimar.04495.25A.
- Polli, B. A.; Cunha, C. L. N.; Almeida, R. C.; Gobbi, M. (2021) - Evaluation of the impacts caused by wind field and freshwater flow variations due to climate change on the circulation of the Paranaguá Estuarine Complex, Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 47: 101933. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101933.
- Prandle, D.; Lane, A. (2015) - Sensitivity of estuaries to sea level rise: Vulnerability indices, Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, 160: 60-68. DOI: 10.1016/j.ecss.2015.04.001.
- Quetzalcóatl, M. G.; Cánovas, V.; Medina, R.; Espejo, A.; Klein, A.; Tessler, M.G.; Almeida, L.R.; Jaramillo, C.; Garnier, R.; Kakeh, N.; González-Ondina, J. (2019) - SMC, a coastal modeling system for assessing beach processes and coastal interventions: Application to the Brazilian coast. *Environmental Modelling & Software*, 116: 131-152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.03.001.
- Rosman, P.C.C. (2021) *Referência Técnica do Sisbahia - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. In: Programa COPPE: Engenharia Oceânica. Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil. <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>. (in Portuguese).
- Truccolo, E.; Schettini, C. (2010) - Marés astronômicas na baía da Babitonga, SC. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 3: 57-66. DOI: 10.14210/bjast.v3n1. (in Portuguese).
- Yang, Z.; Wang, T.; Voisin, N.; Copping, A. (2015) - Estuarine Response to River Flow and Sea-Level Rise Under Future Climate Change and Human Development. *Est. Coast Shelf Sci*, 156: 19-30. DOI:10.1016/j.ecss.2014.08.015.
- Yin, J.; Yu, D.; Lin, N. ; Wilby, R. L. (2017) - Evaluating the cascading impacts of sea level rise and coastal flooding on emergency response spatial accessibility in Lower Manhattan, New York City. *Journal of Hydrology*, 555: 648-658. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.067.

REMOTE SENSING APPROACHES FOR LAND USE/LAND COVER CHANGE IN COASTAL AREAS AND OCEANIC ISLANDS: AN OPEN SCIENCE-BASED SYSTEMATIC REVIEW

Rafaela Tiengo^{@ 1, 2, 3}, Alicia Palácios-Orueta^{1, 4}, Jéssica Uchôa^{2, 3}, Artur Gil³

ABSTRACT: In the current climate change context, detecting and monitoring relevant land use/land cover (LULC) changes in insular and coastal areas is critical as soon as they occur. This research consists of a systematic literature review of 167 open-access articles from January 2010 to June 2022, based on several parameters, namely year of publication, journals, geographic location of the study area, time range of the studies, data source, data type, sensors, remote sensing-based approach, data processing algorithms, accuracy assessment approach, and spatial resolution, using the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses (PRISMA) declaration as a guideline. The results revealed that the years 2020 and 2021 showed the highest number of studies published, namely 33 for each year (20%). The continent with the most case studies was Asia (48%), with China being the most productive country in this field (23%). The most analyzed time range was superior to 20 years (37% of the studies). Satellite imagery was the most applied data source (77%), followed by relevant historical data (e.g., land cover maps). The multispectral data was used in 77% of the studies, and the Landsat Mission represents three of five of the most used sensors. Normalized Difference Vegetation Index was the most applied remote sensing-based approach (10%), and the Maximum Likelihood Classifier Algorithm was the most widely used data processing algorithm (10%). The Overall Accuracy is the most applied accuracy assessment approach used in 85 papers (51%). Many articles used a 30-meter spatial resolution (69%), and higher resolutions completed the top 5 approaches. This study contributes to perceiving the main current approaches for monitoring LULC changes in insular and coastal environments to identify research gaps for future developments.

Keywords: Land cover; land use; change detection; remote sensing; oceanic islands; coastal areas; climate change; natural hazards.

RESUMO: No contexto atual das alterações climáticas, é fundamental detectar e monitorar alterações relevantes de uso/cobertura do solo em áreas insulares e costeiras logo que ocorram. A presente investigação consiste numa revisão sistemática da literatura de 167 artigos de acesso aberto publicados de Janeiro de 2010 a Junho de 2022, com base em diversos parâmetros, nomeadamente ano de publicação, revistas, localização geográfica da área de estudo, intervalo temporal analisado nos artigos, fonte de dados, tipo de dados, sensores, métodos baseados em sensoriamento remoto, algoritmos de processamento de dados, métodos de acurácia e resolução espacial, usando a declaração Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) como diretriz. Os resultados revelaram que os anos de 2020 e 2021 apresentaram o maior número de estudos publicados, ou seja, 33 para cada ano (20%). O continente com mais estudos de caso foi a Ásia (48%), sendo a China o país mais produtivo neste domínio (23%). O intervalo temporal mais analisado foi superior a 20 anos (37% dos estudos). Imagens de satélite foram a fonte de dados mais aplicada (77%), seguidas por dados históricos relevantes (por exemplo, mapas de cobertura da terra). Os dados multiespectrais foram utilizados em 77% dos estudos, sendo que a Missão Landsat representa três dos cinco sensores mais utilizados. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada foi o método baseado em sensoriamento remoto mais aplicado (10%) e o Algoritmo Classificador de Máxima Verossimilhança foi o algoritmo de processamento de dados mais amplamente utilizado (10%). O Overall Accuracy é o método de acurácia mais aplicado, usado em 85 artigos (51%). Muitos trabalhos usaram uma resolução espacial de 30 metros (69%) e resoluções espaciais maiores completaram as cinco mais utilizadas. Este estudo contribui para perceber as principais abordagens atuais para monitorar alterações no uso/cobertura do solo em ambientes insulares e costeiros para identificar lacunas de pesquisa para desenvolvimentos futuros.

Palavras-chave: Cobertura do solo; uso do solo; deteção de mudança; sensoriamento remoto; ilhas oceânicas; áreas costeiras; alterações climáticas; riscos naturais.

@ Corresponding author: rafaela.p.tiengo@azores.gov.pt

- 1 Departamento de Ingeniería Agroforestal. ETSIAAB –Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- 2 cE3c – Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes, Azorean Biodiversity Group, CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Faculty of Sciences and Technology, University of the Azores, 9500-321 Ponta Delgada, Portugal.
- 3 Research Institute for Volcanology and Risks Assessment (IVAR), University of the Azores. 9500-321 Ponta Delgada, Portugal
- 4 Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales (CEIGRAM), Universidad Politécnica de Madrid, Paseo de la Senda del Rey, nº 13, 28040 Madrid, Spain

Submission: 13 MAR 2023; Peer review: 17 MAR 2023; Revised: 28 AGO 2023; Accepted: 28 AGO 2023; Available on-line: 8 FEB 2023

1. INTRODUCTION

Insular ecosystems are natural laboratories where evolution processes can be isolated and studied to be linked and extended to the more complex patterns exhibited by more extensive mainland systems. In analogy, islands may also provide insights into effective management approaches (Calado *et al.*, 2015). However, island environments are also more vulnerable to anthropogenic pressure and natural hazards. The 2018 IPCC report (<https://www.ipcc.ch/sr15/>, accessed on 13 August 2022) on Climate Change suggested an increase in extreme hydrogeological events and greater peak temperatures that expose these systems to a higher risk of natural disasters such as wildfires and flash floods (Allen *et al.*, 2019).

Small islands are land areas with less than 10,000 km² and a population under 500,000 inhabitants, and they are essentially coastal entities (Saffache and Angelelli 2010). Oceanic islands face several obstacles to full development (remoteness, insularity, terrain, climate, economic dependence, and narrow range of the goods they produce) and also severe environmental issues (climate variability and changes, proliferation of invasive, exotic species, natural catastrophes, and overexploitation of natural resources) (Rietberger *et al.*, 2007).

The main threat to sustainability in small islands is LULC change, driven mainly by urban development (García-Romero *et al.*, 2016), the spread of invasive alien species (Gil *et al.*, 2014), natural hazards (Lira *et al.*, 2013), and an intensification of agricultural activity and livestock grazing (Gil, Fonseca, and Benedicto-Royuela 2018).

In the current climate change context and also taking into account the high susceptibility of most of these territories to natural hazards (e.g., landslides, volcanic eruptions, earthquakes), it is essential to detect and monitor relevant LULC changes as soon as they occur, to identify and address their drivers and triggers through effective land/coastal planning and management policies.

Remote sensing (RS) change detection (CD) is commonly defined as a process to identify differences in geographical surface phenomena over time (Singh, 1989; Bruzzone and Bovolo, 2013). The CD is also defined as a process to identify significant differences in sequential pixel appearances due to object emergence, disappearance, movement, or shape alteration (Radke *et al.*, 2005). The detection process includes observing and evaluating differences over time to document biophysical and physical phenomena spectral and temporal progression (Mouat, Mahin, and Lancaster 1993).

The acceleration of change globally driven by naturogenic, and anthropogenic factors creates more significant variability of change processes. Hence, bitemporal, multitemporal, and time series CD techniques are needed to investigate heterogeneous change types, intensities, and process durations to suit the various purposes of studies. The era of freely accessible data, in parallel with the growth of non-proprietary toolboxes, should propagate doubly through RS communities and users (Panuju *et al.*, 2020).

The purpose of this paper is to perceive the research background reviewing the current state-of-the-art in multi-sensor LULC changes detection in RS datasets availability/complementarity, methodological approaches, techniques, and parameters. A systematic literature review was conducted using the PRISMA statement as a guideline to achieve this goal.

2. METHODS

A systematic literature review was carried out of academic articles indexed on the Web of Science database (<https://www.webofscience.com/>, accessed on 13 August 2022), using the PRISMA statement as a guideline (<https://www.prisma-statement.org/>, accessed on 13 August 2022), to identify the relevant scientific work already published on LULC change, estimation, and prediction in the oceanic island and/or coastal areas.

The PRISMA 2020 statement is beneficial when planning and performing systematic reviews to ensure that all necessary information is gathered. The PRISMA statement aims to increase the transparency and scientific validity of a reported systematic review or meta-analysis. Using the PRISMA statement and its extensions to write protocols or the completed review report, as well as to complete the PRISMA checklists, is likely to not only inform reviewers and readers about what authors did and discovered but also to improve the quality of reporting and make the peer review process more efficient (Swartz 2011; Sarkis-Onofre *et al.*, 2021). For these reasons, this methodology was selected to guide this systematic review.

A search was conducted utilizing nine combinations of relevant keywords and Boolean operators inside each study's title, abstract, and keywords (Figure 1). Review papers, conference papers, and articles written in non-English languages or non-open-access were excluded. The search was done between January 2010 and June 2022.

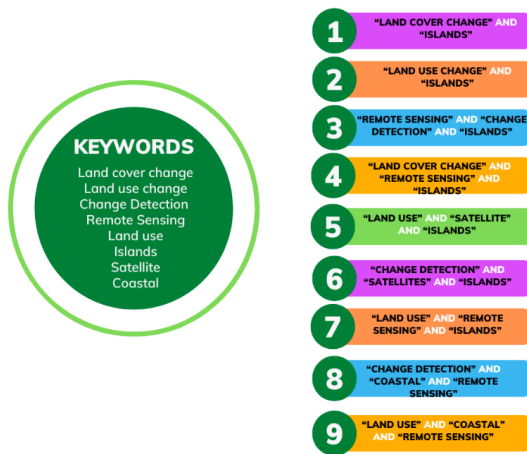


Figure 1. Search criteria adopted: keywords combinations.

The PRISMA approach is separated into three steps: (1) identification, (2) screening, and (3) inclusion. Figure 2 depicts the full literature search and subsequent filtering to identify the final articles for review.

In step 1 (identification), 670 studies were identified. The search obtained different results from each keyword combination (Figure

1). Search 6 got fewer results than the others (15 papers), and Search 9 presented the most results (285 articles). The first phase of the PRISMA process also includes removing duplicate research, which accounted for 112 of the totals.

In step 2 (screening), 391 papers from 558 were excluded based on the title and abstract review. It excluded (1) articles from non-RS sources that did not use CD methods as the primary approach; (2) articles in which the study area was not on islands or coastal areas, and (3) papers whose subject was not LULC-related. The last parameter represents a large number of excluded papers. It occurred due to the use of “islands” as a keyword generating results with “heat islands” subject papers, which is not the focus of this review paper.

In step 3 (inclusion), the remaining articles were selected for full-text analysis to extract relevant information. From 167 articles, the following information was extracted: (1) year of publication; (2) journal; (3) geographic location; (4) time range; (5) data source; (6) data type; (7) sensors; (8) RS-based approach; (9) data processing algorithm; (10) accuracy assessment approach and (11) spatial resolution (Table 1).

A list of abbreviations and acronyms used throughout the text is provided in Table 2 to aid in the readability of this paper.

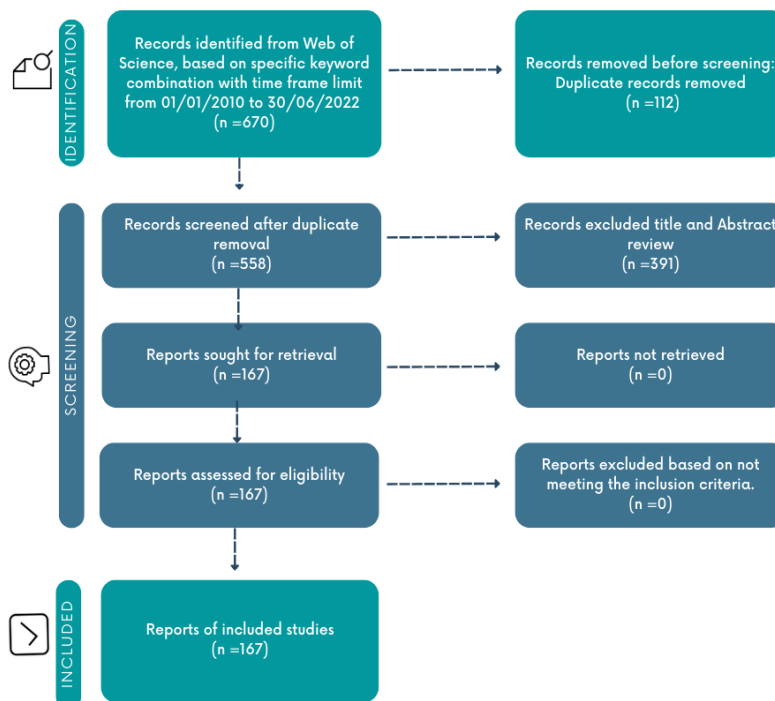


Figure 2. Workflow chart of the literature search process to identify relevant scientific articles about land use/land cover monitoring with RS data. An initial pool of publications was collected in Web of Science (n = 670). After screening each article’s title, abstract, and keywords, 167 relevant articles remained.

Table 1. Structure of the file created to extract the data of interest.

Feature	Data Type	Description
Title	Free text	Article title
Author (s)	Free Text	Author's names
Year	Categorical	Published year
Journal	Free text	Published journal
DOI	Code	Article DOI
Keywords	Free Text	Article's keywords
Region	Categorical	The continent in which the study area is located
Country/countries	Free text	Country/countries in which the study area is/are located
Data Source	Free text	Data sources (e.g., literature review, historical data)
Data Type	Free text	Data type (e.g., multispectral, SAR, LiDAR)
Sensors	Free text	Sensor (e.g., Sentinel-2, Landsat 8)
RS-based Approach	Free text	RS-based approach (e.g., Vegetation Indices, Image Difference, Image Ratio, Principal Components Analysis)
Data Processing Algorithm	Free text	Algorithms (e.g., Random Forest)
Accuracy Assessment Approach	Free text	The approach applied to the data analysis to verify the accuracy of the results (e.g., Kappa Index)
Spatial Resolution	Free text	Pixel size (in meters)

Table 2. List of abbreviations and acronyms.

Abbreviation/ Acronym	Meaning	Abbreviation/ Acronym	Meaning
ALOS	Advanced Land Observing Satellite	OA	Overall Accuracy
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	OBC	Object-Based Classification
CD	Change Detection	PA	Producer's Accuracy
CNN	Convolutional Neural Networks	PCA	Principal Component Analysis
DEM	Digital Elevation Model	PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
ESA	European Space Agency	RF	Random Forest
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique	RS	Remote Sensing
KI	Kappa Index	SAR	Synthetic-Aperture Radar
LiDAR	Light Detection and Ranging	SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
LULC	Land Use and Land Cover	SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
MLCA	Maximum Likelihood Classifier Algorithm	SVM	Support Vector Machine
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	UA	User's Accuracy
NDWI	Normalized Difference Water Index	UAV	Unmanned Aerial Vehicle
		VI	Vegetation Indices

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Year of publication

Analyzing the number of yearly scientific articles might indicate trends and patterns. It can assist in identifying whether a particular topic of study is growing or declining in popularity. The articles analyzed in this paper were published between January 1st, 2010, and June 30th, 2022. The number of studies varied over the years without an apparent pattern or trend (Figure 3).

The years 2020 and 2021 showed the highest number of studies published, namely 33 for each year (20%) (Norder *et al.*, 2020; Xi *et al.*, 2021; Abd & Hazem 2020; Magolan and Halls 2020; Dang *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021; Gray *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2020; Xi *et al.*, 2021) representing 40% of the papers in only two of the 12 years analyzed. An overall discussion identified increased publications in 2019, 2020, and 2021.

On the contrary, 2011 was the year with the lowest number of published works, with just two studies (1%) (Broich *et al.*, 2011; Lyons, Phinn, and Roelfsema 2011) followed by 2012 with three papers (2%) (Gil *et al.*, 2012; Hamylton and East 2012), 2010 with four articles (2%) (Chang *et al.*, 2010; Vassilakis 2010; Wang *et al.*, 2010; Berberoğlu *et al.*, 2010); 2014 with five studies (3%) (Rapinel *et al.*, 2014; Palacio-Aponte 2014; Du *et al.*, 2014; Dusseux *et al.*, 2014); 2015 with six papers (4%) (Tran, Tran, and Kervyn, 2015; Sanchez *et al.*, 2015; Marlier *et al.*, 2015; Singh, Engelbrecht, and Kemp 2015; Shapiro *et al.*, 2015) and 2013 with seven studies (4%) (Chen *et al.*, 2013; Cardoso *et al.*, 2013; Cao and Gao 2013; Kaiser *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Welch *et al.*, 2013). In 2019, 24 studies (14%) were published (Hou and Hou 2019; Austin *et al.*, 2019; Villarreal *et al.*, 2019; Saikia *et al.*, 2019; Worrall *et al.*, 2019; Tran *et al.*, 2019; Liu and Hu

2019; Li *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019; Schubert *et al.*, 2019; Fauzi *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2019; Ding *et al.*, 2019; Matlhodi *et al.*, 2019; Révillion, Attoumane, and Herbretreau 2019; Meilianda *et al.*, 2019; Pelage *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2019; Ibarrola-Ulzurrun *et al.*, 2019; Abdullah *et al.*, 2019) followed by 2017 with 15 papers (9%) (Qiu *et al.*, 2017). In 2016 and 2022 (until June 30th), 12 articles were published each year (7% each year) (Alom, Paque, and Maertens 2022; Wu *et al.*, 2022; Nguyen *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022; Gameiro *et al.*, 2022; Caballero *et al.*, 2022; Roy *et al.*, 2022; Brown *et al.*, 2022; Morgan *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2022; Hernández, Morell, and Armstrong 2022) and in 2018, 11 studies (7%) were published (Bremer *et al.*, 2018; Abdel-Hamid *et al.*, 2018; Kefalas *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2018; Benítez, Mena, and Zurita-Arthos 2018; Lin *et al.*, 2018; Sunwoo, Nguyen, and Choi 2018; Filippini *et al.*, 2018; Xu 2018).

3.2 Journals

Analyzing the journal publications statistics can provide valuable insights into the quality and impact of research being published in a particular journal, as well as trends over time, and can help inform decisions about resource allocation.

The “Remote Sensing Journal” published most publications on these selected topics (Figure 4). Forty-five papers (26%) were published in this open-access journal (Chen *et al.*, 2022; Magolan and Halls 2020; Zhu *et al.*, 2021; Gray *et al.*, 2021; Ding *et al.*, 2017; Tu *et al.*, 2021; Peng *et al.*, 2021; Elmahdy, Mohamed, and Ali 2020; Salgueiro, Marcello, and Vilaplana 2021; Wu *et al.*, 2022; Muro *et al.*, 2016; Vassilakis 2010; Tran, Tran, and Kervyn 2015; Hilgendorf *et al.*, 2021). Numerous factors may have contributed, such as the (1) main focus on the RS topic; (2) the high journal rank and Impact Factor; (3)

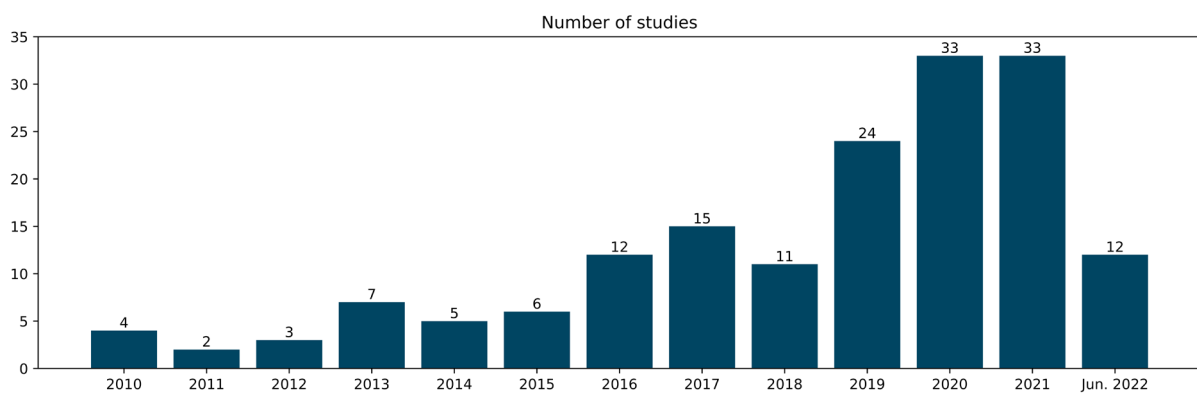


Figure 3. Distribution of the articles across the years (n=167).

the noteworthy visibility in several databases (e.g., Scopus, Web of Science, Ei Compendex, PubAg, GeoRef, Astrophysics Data System, etc.); and (4) open-access for readers; amongst other factors of author's interests.

The "Sustainability Journal" has published 12 papers (7%) (Kefalas *et al.*, 2018; Abdel-Hamid *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2020; Xi *et al.*, 2021; Schubert *et al.*, 2019; Ballanti *et al.*, 2017; Eshetu Yirsaw *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2016; Newman *et al.*, 2020; Matlhodi *et al.*, 2019). The "Land Journal", the "International Journal of Geo-Information", and the "Environmental Research Letters Journal" published six papers each (Benítez, Mena, and Zurita-Arthos 2018; Hou and Hou 2019; Broich *et al.*, 2011), representing 3% of the total.



Figure 4. Distribution according to the journals where the papers analyzed were published (n=167) (top 5 highlighted).

The other 58% included journals such as the "Journal of Applied Remote Sensing", "PLOS One", "IEEE Access", and "Remote

Sensing of Environment", with 2% each. In addition, the "Applied Ecology" and "Environmental, Ecology and Society", "Forest and Society", "Island Studies Journal", and the "South African Journal of Geomatics" represent 1% of the total.

3.3 Geographic Location

The 167 studies selected were distributed over six continents (Figure 5). Eighteen studies (11%) were conducted in North America, and nine studies (5%) in South America (Conti, de Araújo, and Cunha-Lignon 2016; Xu 2018; Chen, Ming, and Menenti 2020; Bremer *et al.*, 2018; Cherrington *et al.*, 2020; Hernández, Morell, and Armstrong 2022; Morgan *et al.*, 2022; Mccarthy *et al.*, 2020). Fourteen studies (8%) were conducted in Africa (Ramjeawon *et al.*, 2020; Zanzo *et al.*, 2021; Matlhodi *et al.*, 2019; Singh, Engelbrecht, and Kemp 2015; Hamylton and East 2012; Eid *et al.*, 2020), 28 studies (17%) in Europe (Tassi and Gil 2020; Wicki and Parlow 2017; Xie and Niculescu 2021; Dusseux *et al.*, 2014; Ibarrola-Ulzurrun *et al.*, 2019; Giza *et al.*, 2021), 80 studies (48%) in Asia (Zhang *et al.*, 2013; Guan *et al.*, 2020; Meilianda *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2019), six studies (4%) in Oceania (Bell and Callow 2020; Lymburner *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2021; Chamberlain, Phinn, and Possingham 2020; Lyons, Phinn, and Roelfsema 2011; Delevaux and Stamoulis 2022), and 12 studies (7%) have more than one study area (Bhatia and Cumming 2020; Hou and Hou 2019; Norder *et al.*, 2020; Villarreal *et al.*, 2019).

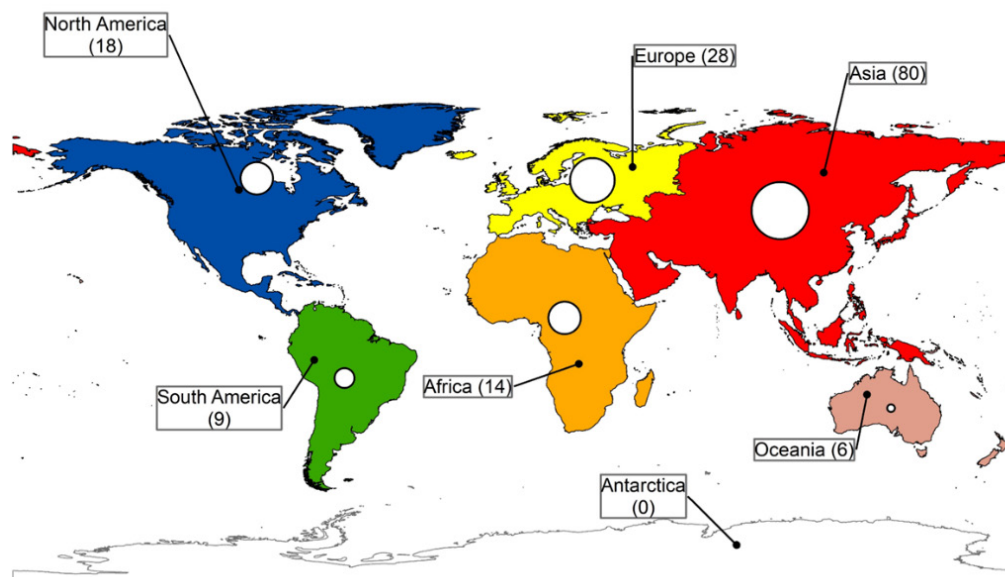


Figure 5. The geographical location of the analyzed studies. About 47% of all articles analyzed (n=167) have a study area in Asia, followed by Europe and America (16% each continent) and Africa (8%).

The studies covered more than 40 countries (Figure 6), such as Brazil (Pelage *et al.*, 2019), Portugal (Tassi and Gil 2020), Mexico (Palacio-Aponte 2014), Tanzania, and Mozambique (Ferreira *et al.*, 2012), among many others. China showcases the highest number of studies with 39 papers (23%) of the total (Hua *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2022) followed by the United States of America with 13 studies (7%) (Bremer *et al.*, 2018; Villarreal *et al.*, 2019), Vietnam with 11 studies (6%) (Tran *et al.*, 2019; Nong *et al.*, 2021), Portugal with ten studies (7%), and Indonesia with nine studies (5%).

3.4 Time Range

Time series analysis in RS refers to techniques and methods for extracting information about the landscape characterized by spectral and temporal variations. These are frequently applied to individual pixels independently (i.e., no interaction between pixels) (Rembold *et al.*, 2015). Times series satellite imagery is utilized in diverse ways to monitor LULC dynamics. Given the availability of a diverse collection of satellite datasets (detailed in section 3.7 of this article), the frequency and length of time series analysis on papers that used RS approaches are being increased to identify, understand the triggers, and calculate damages and impacts (e.g., environmental and socioeconomic impacts) (Chen *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2019).

Time series data is essential for several reasons. First, it allows researchers to identify patterns and trends in the data that may

not be apparent from a single image. For example, changes in vegetation may only be evident over time as plants grow and mature (Huete *et al.*, 2002). Second, time series data can help researchers understand how the Earth’s surface changes over time due to natural or human-induced factors, such as climate change or LULC (Thapa 2022). Finally, time series data can be used to develop models predicting future changes (El-Hamid *et al.*, 2022), which can be valuable for planning and management purposes.

In terms of the time range, 62 studies (37%) have analyzed more than 20 years (Figure 7) (Magolan and Halls 2020). It is critical to highlight the positive impact of the Landsat Mission (1970 to the present) and the data-free availability since 2008 (Abdel-Hamid *et al.*, 2018) which consists of a relevant contribution to analyzing time series using RS approaches (Hemati *et al.*, 2021).

Among the analyzed studies, 45 papers (27%) examined a time spanning 10 to 20 years (Alom, Paque, and Maertens 2022). Additionally, 15 studies (9%) investigated imagery covering 5 to 10 years (Tran *et al.*, 2019) while 18 studies (11%) analyzed a time frame of one to 5 years (Rapinel *et al.*, 2014). Finally, 16 studies (10%) focused on one year or less imagery (Qiu *et al.*, 2017) and 11 studies (6%) did not mention the time range and/or the date of the satellite imagery used (Elhag and Boteva 2020). The duration of the time frame analyzed by each study varied, providing valuable insights into changes that occurred over time.

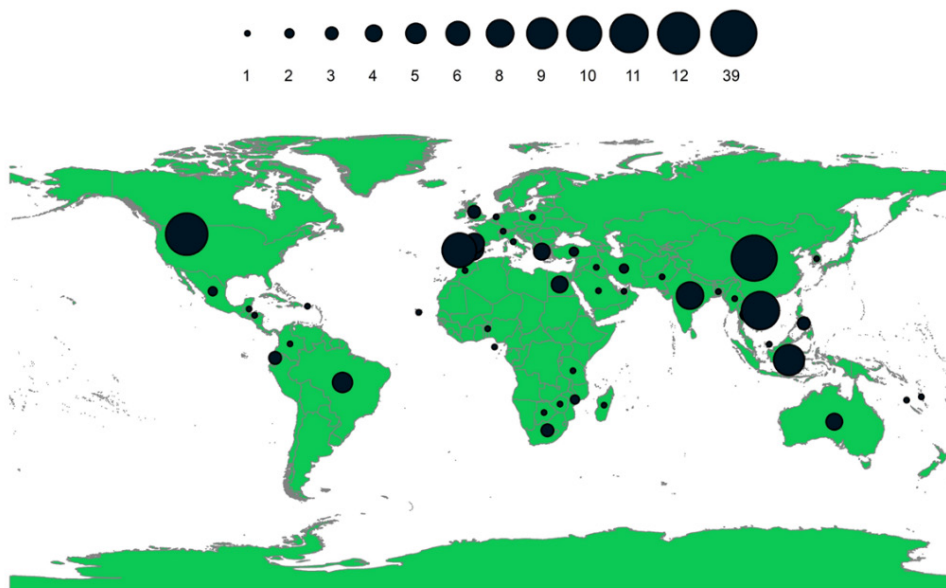


Figure 6. Map of the spatial distribution of study areas at the country level.

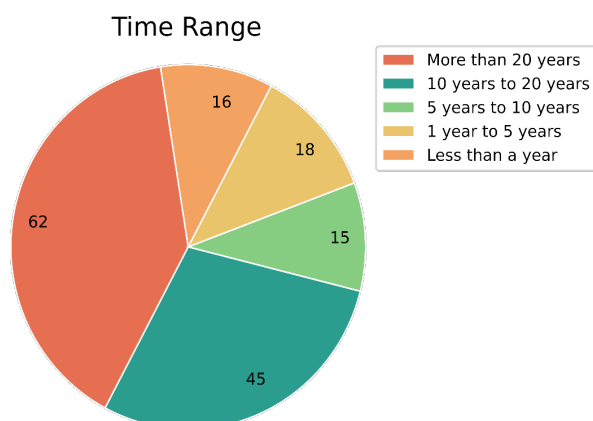


Figure 7. Overview of the time range analyzed in LULC change papers focused on small oceanic islands and/or coastal areas (n=167).

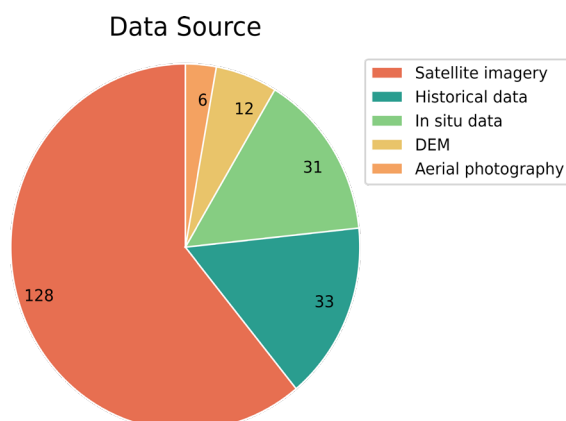


Figure 8. Distribution according to the data source used on the papers analyzed (top 5 highlighted).

3.5 Data Source

Identifying and informing on the availability of data sources used in RS studies focused on LULC change in coastal areas and oceanic islands is essential to assess and compare their effectiveness and reliability.

The most used data source was satellite imagery (Figure 8). This data was applied in 128 studies (77%). This data source includes different data types (e.g., Multispectral, SAR, LiDAR) and sensors (e.g., Landsat 8, Sentinel-2, Worldview-2) which will be described in topics 3.6 and 3.7 of this paper. The historical data was used in 33 studies, representing 20% of the papers analyzed. The historical data consists mainly of land cover datasets (e.g., NOAA C-CAP land cover, Corine land cover) (Ferrarini, Gustin, and Celada 2021; Grybas, Congalton, and Howard 2020). In situ data was applied in 32 papers (19%). This data source consists of field measurements (Zhang *et al.*, 2013; Magolan and Halls 2020; Tran *et al.*, 2019; Muro *et al.*, 2016; Kaiser *et al.*, 2013) and questionnaires to the community or stakeholders (Nong *et al.*, 2021). The Digital Elevation Model (DEM) was used in 12 studies (7%) (Yirsaw *et al.*, 2016; Ballanti *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2019; Dang *et al.*, 2020; Eid *et al.*, 2020; Oliveira, Disperati, and Alves 2021). Different DEM types were applied in those studies (e.g., Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Advanced Land Observing Satellite (ALOS), ASTER). The aerial photographs were used in six articles (4%) (Magolan and Halls 2020; Reynolds and Walker 2016; Ballanti *et al.*, 2017; Giza *et al.*, 2021; Berberoğlu *et al.*, 2010; Hamylton and East 2012). This data type was mainly applied to mapping land cover transitions.

3.6 Data Type

The data type consists of a relevant parameter in RS analysis since different types of data have different characteristics, which can affect the results and conclusions of the research. The multispectral data captures information about the reflectance of different wavelengths of light, which can be used to identify and classify different land cover types (Acción, Argüello, and Heras 2021). The radar data can be used for vegetation mapping by measuring the backscatter of radar signals from vegetation. The SAR data was recently made widely available after the Sentinel-1 launch and the open data policy by the European Space Agency (ESA) in 2014. The LiDAR data uses laser pulses to create highly detailed 3D maps of the Earth's surface, which can be used for terrain modeling, vegetation mapping, and other applications (Lopac *et al.*, 2022). The UAVs offer low-cost and swift data collection at a local scale, with the advantage of being fitted with cameras of very high spatial resolution (Elamin and El-Rabbany 2022).

The information on data type used in an RS study can help researchers understand the limitations and strengths of the data and methods used. It can also help other researchers replicate or build upon the study's findings and ensure that the appropriate data processing and analysis techniques are used to extract meaningful information from the data.

The multispectral data was used in 129 articles (77% of the total) (Hua *et al.*, 2017; Magolan and Halls 2020) (Figure 9). There are strong reasons that may have supported this option, namely (1) the straightforward visual interpretation of the data acquired in the visible mode (Pirowski, Szypuła, and Marciak 2022); (2) the large number of multispectral sensors operating

over the entire world since the 1970s (Lambin 2001); (3) the vast number of multispectral sensors with open access data. The combined use of multispectral and LiDAR data was used in five articles (3%) (Ballanti *et al.*, 2017; Gray *et al.*, 2021; Kefalas *et al.*, 2018; Hilgendorf *et al.*, 2021; Lymburner *et al.*, 2020). The combination of multispectral and SAR data occurred in five papers (3%) (Abdel-Hamid *et al.*, 2018; Tu *et al.*, 2021; Muro *et al.*, 2016; Howison *et al.*, 2018; Dusseux *et al.*, 2014), although only three papers (2%) used SAR data exclusively (Meilianda *et al.*, 2019; Chen, Ming, and Menenti 2020; Li *et al.*, 2021). Four articles (2%) used other data types of combinations (e.g., Multispectral, LiDAR, and UAV (Gray *et al.*, 2021) and Multispectral and UAV (Miranda *et al.*, 2020; Bremer *et al.*, 2018). Twenty-one papers (13%) did not mention the data type, or the analysis was based on LULC maps and aerial photographs, among others, as mentioned in topic 3.5 of this paper.

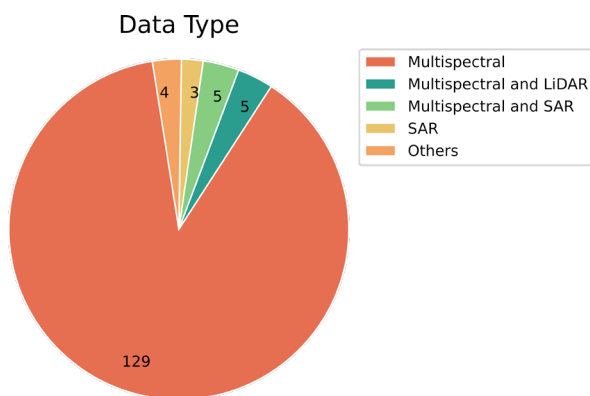


Figure 9. Distribution according to the data type used on the papers analyzed.

wavelength), C-band (5.43 to 5.66 cm wavelength), L-band (20 to 60 cm wavelength), and P-band (60 to 120 cm wavelength) are relatively immune to atmospheric effects. LiDAR sensors, on the other hand, cannot penetrate clouds because they emit green or near-infrared light (Kacic and Kuenzer 2022).

The Landsat 5 data was included in 79 publications (47%) and is the most often used sensor (Figure 10) (Palacio-Aponte 2014; Villarreal *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2012). Landsat 8 was used in 58 publications (35%) (Benítez, Mena, and Zurita-Arthos 2018; Chamberlain, Phinn, and Possingham 2020; Caballero *et al.*, 2022), Landsat 7 was used in 47 studies (28%) (Bhanage, Lee 2020; Hafyani *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020), Sentinel-2 in 18 publications (11%) (Brown *et al.*, 2022; Dang *et al.*, 2020; Oliveira, Disperati, and Alves 2021; Davis and Douglass 2021; Nguyen *et al.*, 2020; Haris *et al.*, 2021), WorldView-2 in 12 papers (7%).

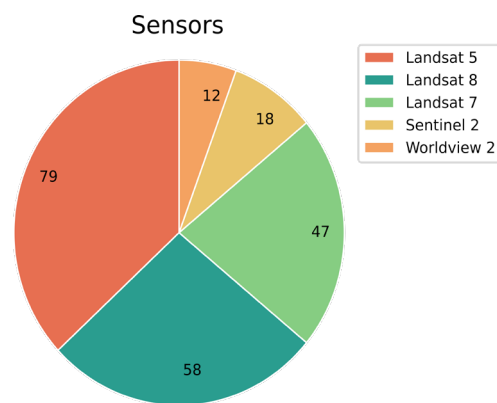


Figure 10. Overview of the different RS sensors used in the reviewed articles (top 5 highlighted).

3.7 Sensors

The assessment of sensors used in the examined literature reveals a diverse spectrum of instruments and missions. Generally, sensors are classified as active (e.g., LiDAR and SAR) or passive (multispectral). In contrast to active sensors, passive RS sensors do not have their own energy source and do not produce radiation. Furthermore, passive sensors detect solar radiation reflected by items on the Earth’s surface, such as vegetation (Kacic and Kuenzer 2022). The radiation being monitored is frequently detected in wavelengths ranging from visible light to shortwave infrared. Furthermore, passive sensors are susceptible to atmospheric factors (e.g., clouds), whereas active sensors emit radiation that is assessed again once an item returns. Active radar sensors in the X-band (2.5 to 3.75 cm

A strong dominance of multispectral sensors (about 77% of all integrated sensors) is emphasized by the fact that sensors from the Landsat mission contribute to about 54% (91 papers) of the total number of selected articles (n = 167), namely by taking advantage of the continuous time-series from Landsat sensors (1972-onwards), provided by the Landsat archive since 2008 (USGS 2018; Woodcock *et al.*, 2008). These datasets acquired from Landsat 1 to Landsat 9 have allowed researchers to study changes in land surface dynamics at a unique temporal scale and medium spatial resolution. Very high spatial resolution RS datasets comprise mainly commercial multispectral sensors, including WorldView-2.

3.8 Remote Sensing-based Approach

The RS-based approach analysis in the evaluated publications reveals a diverse set of methodological approaches employed (225 in total). The Vegetation Indices (VI), especially the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), have been widely used for assessing and monitoring vegetation. NDVI was used in 44 (26%) of the 167 studies analyzed (Figure 11) (Zhao *et al.*, 2022; Ren *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022; Grybas, Congalton, and Howard 2020). This index uses the red channel information (radiance or reflectance), the most substantial chlorophyll absorption region. In contrast, the near-infrared channel is located in the higher reflectance plateau of vegetation canopies (Gao 1996).

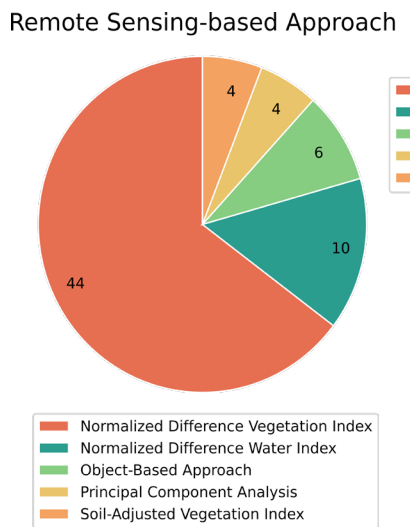


Figure 11. Distribution according to the approach used on the papers analyzed (top 5 highlighted).

The Normalized Difference Water Index (NDWI) is a vegetation index that assesses the leaf water content at the canopy level. This approach was used in 10 papers (6%) (Grybas, Congalton, and Howard 2020; Kefalas *et al.*, 2018; Dang *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021; Yasir *et al.*, 2020; Davis and Douglass 2021; Abdullah *et al.*, 2019; Xu 2018).

Object-Based Classification (OBC) was applied in six studies (4%) (Xie and Niculescu 2021). The OBC approach uses an image segmentation algorithm to group pixels with similar spectral characteristics into homogeneous image objects, which are then classified individually (Desheng and Xia 2010).

The Principal Component Analysis (PCA) is used for data compression, feature extraction, and image enhancement. PCA

is a statistical method that can reduce the dimensionality of datasets without losing important information. It achieves this by creating new uncorrelated variables, called principal components, which are ordered to capture the most variance in the original data (Jolliffe and Cadima 2016; Machidon *et al.*, 2020). The PCA was applied in four studies (2%) of the total (Xu *et al.*, 2019). The Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) is an RS approach that enables the measurement of vegetation density while reducing the impact of soil background reflectance. Unlike the widely used NDVI, which can be influenced by changes in background reflectance, SAVI incorporates a soil adjustment factor into its formula to provide a more accurate estimate of vegetation density (Huete 1988). This approach was applied in four papers representing 2% of the total.

3.9 Data Processing Algorithms

RS algorithms provide a way to automate the processing and analysis of RS data, allowing researchers to extract information rapidly and accurately about the Earth's surface, such as LULC patterns, vegetation health, water quality, and more. Without algorithms, processing and analyzing RS data would be a time-consuming task that could potentially lose important information (Zhang *et al.*, 2023; Valdivieso-Ros, Alonso-Sarria, and Gomariz-Castillo 2023). Algorithms can help standardize RS data analysis, making comparing data collected by different sensors and at different times easier. This standardization is important for monitoring changes in the Earth's surface over time, such as LULC changes, deforestation, and climate change impacts which is, in general, the focus of this review paper (Zhang *et al.*, 2023; Valdivieso-Ros, Alonso-Sarria, and Gomariz-Castillo 2023).

Data Processing Algorithms

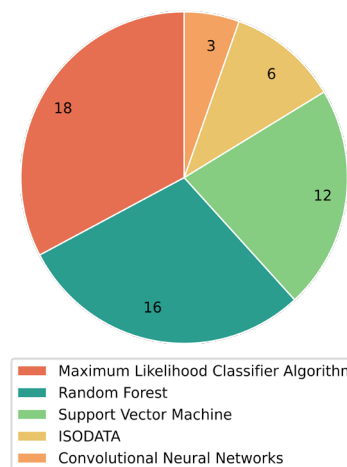


Figure 12. Distribution according to the algorithms used on the papers analyzed (n=167) (top 5 highlighted).

The Maximum Likelihood Classifier Algorithm (MLCA) was applied in 10% of the studies (Figure 12) (Rahman 2016; Dang *et al.*, 2021; Nong *et al.*, 2021; Rapinel *et al.*, 2014). MLCA is based on the statistics for each class in each band and is normally distributed to calculate the probability that a given pixel belongs to a specific class (Ahmad, Quegan, and Quegan 2012).

RF is a statistical algorithm that Breiman first proposed in 2001 (Breiman 2001) to solve classification and regression problems. This algorithm is widely applied in LULC analyses (Gray *et al.*, 2021; Tu *et al.*, 2021; Dang *et al.*, 2020; Abdel-Hamid *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2021; Ramjeawon *et al.*, 2020; Abdullah *et al.*, 2019; Xie and Niculescu 2021) and was used in 16 studies (10%). RF principle consists of combining a large number of regression trees and applying sequentially from the root to the tree's leaves (Bu *et al.*, 2022; Breiman 2001).

The SVM is based on statistics normally distributed for each class in each band and computes the likelihood that a given pixel belongs to a specific class (Pal and Mather 2005). The SVM was applied in 12 studies, representing 7% of the analyzed papers (Ballanti *et al.*, 2017; Abdel-Hamid *et al.*, 2018; Gray *et al.*, 2021; Elmahdy, Mohamed, and Ali 2020; Lin *et al.*, 2018; Ramjeawon *et al.*, 2020; Dang *et al.*, 2020; Morgan *et al.*, 2022; Miranda *et al.*, 2020).

The Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm (ISODATA) was applied in six papers (4%) (Rahman 2016; Sunwoo, Nguyen, and Choi 2018; Ma *et al.*, 2019; El-Hattab 2016). This algorithm is one of the most popular variants of the K-means clustering algorithm. In this unsupervised classification, class means are calculated and dispersed evenly throughout the

data, and the remaining pixels are iteratively clustered using minimum distance methods (Zhang *et al.*, 2021).

Convolutional Neural Networks (CNNs) involve analyzing data collected from satellites or other remote sensors (e.g., UAV). CNNs have shown great promise in various RS applications, such as land use classification, vegetation monitoring, and object detection (Kattenborn, Eichel, and Fassnacht 2019; Guerrero *et al.*, 2022). The CNNs were applied in three papers, representing 2% of the total (Gray *et al.*, 2021).

3.10 Accuracy Assessment Approach

RS is an instrumental approach for monitoring changes in LULC over time. Nevertheless, the accuracy of the classification method must be assessed to assess whether the reported changes are real or just classification errors (Foody 2002). Comparisons are challenging because the accuracy of LULC categorization methodologies employed in one research may differ from that utilized in another. It is critical to understand the accuracy of the categorization system used when comparing the findings of different investigations (Foody 2002). To standardize the understanding of the different accuracy assessment approaches identified in this literature review process, the quantitative accuracy values resulting from applying different accuracy methods mentioned in the papers analyzed were classified as (1) low agreement; (2) moderate agreement; (3) good agreement, (4) excellent agreement and (5) almost perfect agreement. The parameters to classify the values in these categories were based on the methods' accuracy classification (Shivakumar and Rajashekararadhya 2018; Richards 2013; Okwuashi *et al.*, 2012) and synthesized in Table 3.

Table 3. Accuracy assessment approach classification.

Accuracy Method	Low agreement	Moderate agreement	Good agreement	Excellent agreement	Almost perfect agreement
Kappa Index	Below 0.4	0.41 - 0.60	0.61 - 0.75	0.76 - 0.80	0.81 and above
Overall Accuracy					
User's Accuracy	Below 40%	41% - 60%	61% - 75%	76% - 80%	Above 80%
Producer's Accuracy					

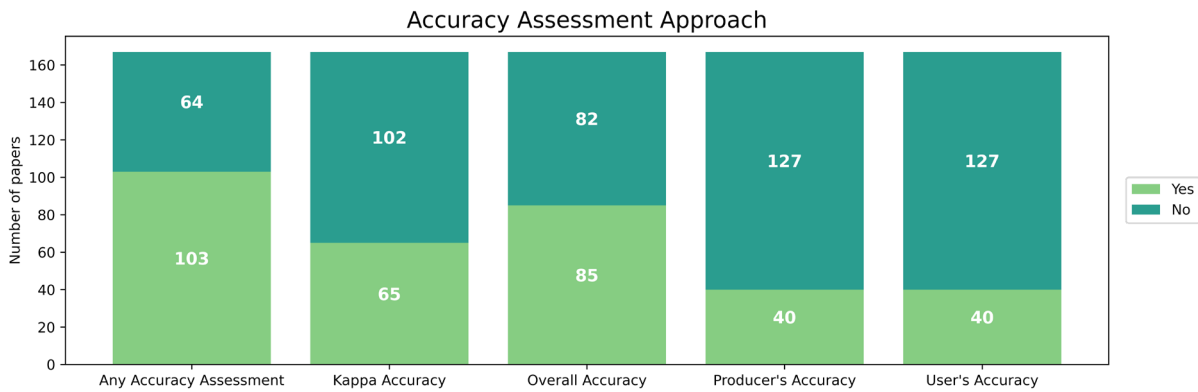


Figure 13. Accuracy assessment approach (n=167).

From the total of papers (n=167), 103 studies (62%) applied an accuracy assessment approach, and 64 papers (38%) did not mention any accuracy assessment approach (Figure 13).

The Kappa Index (KI) was used in 65 studies (39%) (Hafyani *et al.*, 2020; Gevana *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2020; Révillion, Attoumane, and Herbreteau 2019; Zavo *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2019; Abdullah *et al.*, 2019; Hong, Avtar, and Fujii 2019; Dewi and Bijker 2020; Abijith and Saravanan 2021) (Figure 13). The KI is a statistical measure of the extent to which two or more raters or observers agree in their judgments or evaluations of a given target. The KI considers the agreement expected by chance and provides a value ranging from 0 to 1, with higher values indicating greater agreement (Wang, Hu, and Feng 2022; Cohen 1960). The formula for calculating the KI, also known as Cohen's kappa, is as follows:

$$k = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

where Po corresponds to the proportion of observed agreement between raters and Pe to the proportion of expected agreement between raters by chance alone (Cohen 1960). The KI was calculated 94 times on the 65 papers that used this method. From the 94 assessment procedures, the KI showed an almost perfect agreement in 57 (61%), an excellent agreement in 21 (22%), and a good agreement in 12 (13%). Moderate agreement corresponds to 3%, and low agreement to 1% (Figure 14).

The total accuracy of a classification model can be evaluated by a metric known as Overall Accuracy (OA), which was used in 85 studies (51%) of the total (Figure 13). The OA expresses the proportion of correctly classified cases out of all cases

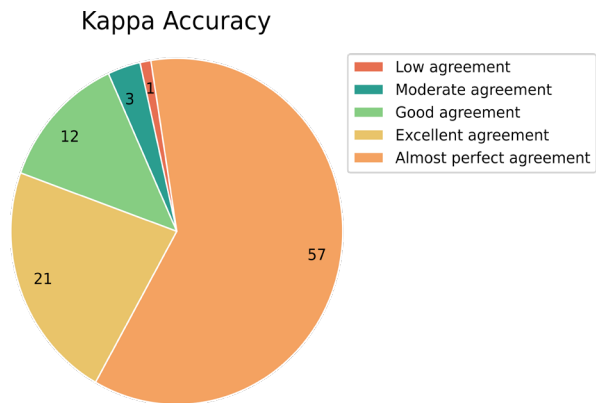


Figure 14. Overview of the Kappa Index accuracy assessment results (n=94).

and is frequently utilized in assessing the performance of LULC classification models, image processing, and RS-based procedures (Congalton 1991). The OA was calculated 129 times on the 85 papers that used this approach. From the 129 assessment procedures, the OA showed an almost perfect agreement in 102 (79%), an excellent agreement in 16 proceedings (12%), and a good agreement in eight of them (6%). Moderate agreements were not identified using OA, and the low agreement corresponds to 2% (Figure 15).

The User's Accuracy (UA) was applied in 40 studies (24%) of the total (Figure 13). The approach measures the accuracy of a classification model that reflects the proportion of correctly classified samples in each class out of the total number of samples classified in that class (Patel and Kaushal 2010). In RS applications, the UA approach is particularly useful in identifying areas of commission errors where a pixel or sample is incorrectly classified as belonging to a certain class. By quantifying the

proportion of samples that are incorrectly classified in each class, the UA approach can help improve the accuracy of classification models and reduce the likelihood of errors in decision-making based on the results (Patel and Kaushal 2010). The UA was calculated 54 times on the 40 papers that used this approach. From the 54 assessment procedures, the UA showed an almost perfect agreement in 42 (78%), an excellent agreement in seven procedures (13%), and a good agreement in five of them (9%). Moderate and low agreements were not identified using UA (Figure 16).

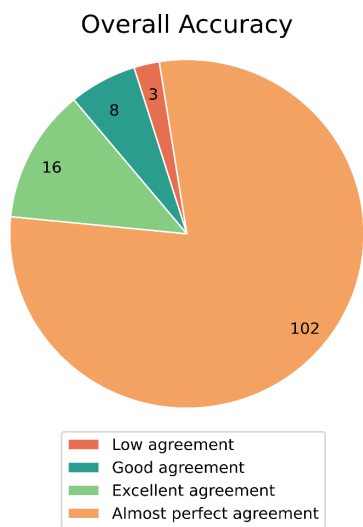


Figure 15. Overview of the Overall Accuracy assessment results (n=129).

The Producer's Accuracy (PA) was applied in 40 studies (24%) of the total (Figure 13). The PA is a statistical metric used in RS and image classification that measures the proportion of correctly classified pixels of a specific land cover class in relation to the total number of pixels in that class. The PA approach measures the reliability of a classification algorithm or model in correctly identifying a particular land cover class (Rwanga and Ndambuki 2017; Congalton 1991). The PA was calculated 54 times on the 40 papers that used this approach. From the 54 procedures, the PA showed an almost perfect agreement in 38 (70%), an excellent agreement in nine assessments (17%), and a good agreement in seven of them (13%). Moderate and low agreements were not identified using PA (Figure 17).

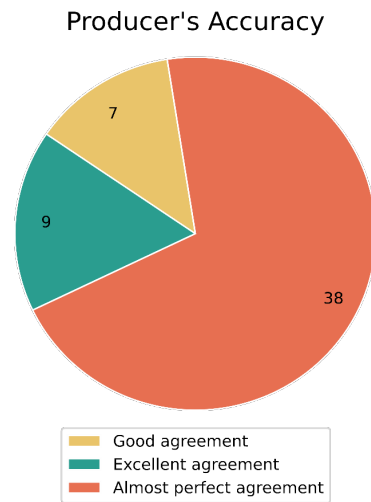


Figure 17. Overview of the Producer's Accuracy assessment results (n=54).

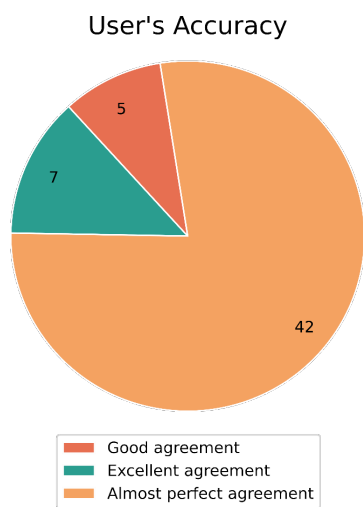


Figure 16. Overview of the User's Accuracy assessment results (n=54).

3.11 Spatial Resolution

Spatial resolution is an essential factor in RS-based analysis because it determines the level of detail that can be extracted from an image. The spatial resolution consists of the measurement of an object by a satellite. This measurement occurs on a geographical area on the ground and refers to the size of each pixel in the image or the area on the ground that each pixel represents. Images with higher spatial resolution have smaller pixels and can capture more detailed information about the Earth's surface, while images with lower spatial resolution have larger pixels and provide a more generalized landscape view.

Most of the work analyzed in this research (69%) used data with a resolution of 30 meters (Figure 19), which represents 116 articles (Li *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019; Tran, Tran, and Kervyn 2015; Zareie *et al.*, 2016). It is mainly due to Landsat data, which also provides panchromatic data with a spatial resolution of 15 meters, which has been used in 32 articles (19%) (Hernández, Morell, and Armstrong 2022; Pervez *et al.*, 2016; Dewi and Bijker 2020; Elmahdy, Mohamed, and Ali 2020). Twenty-eight articles (17%) used 10 meters of spatial resolution RS data (e.g., Sentinel-1, Sentinel-2) (Tu *et al.*, 2021; Muro *et al.*, 2016). Only 11 papers (7%) used RS data with a very high spatial resolution – 2 meters or higher (e.g., QuickBird 2, WorldView-2) (Vassilakis 2010; Rapinel *et al.*, 2014; Schubert *et al.*, 2019; Lyons, Phinn, and Roelfsema 2011), and eight articles (5%) used data with 20 meters of spatial resolution (Wang *et al.*, 2016; Davis and Douglass 2021; Wang *et al.*, 2016).

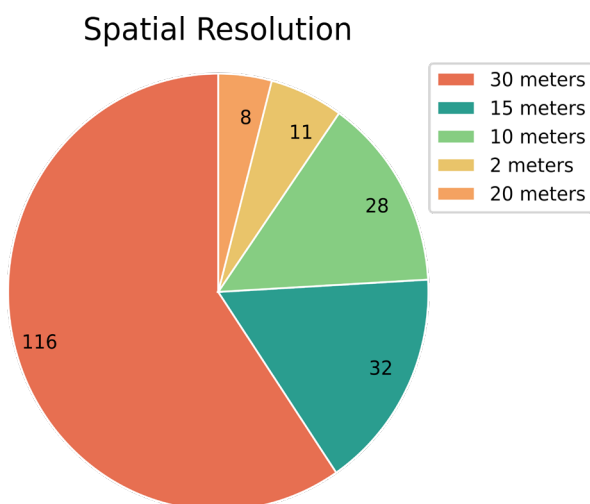


Figure 19. Distribution according to the spatial resolution of the RS data used on the papers analyzed (top 5 highlighted).

4. CONCLUSIONS

This review covered the 167 open-access articles published from January 2010 to June 2022 on remote sensing-based LULC change detection in islands and/or coastal areas. To the best of our knowledge, this is the first review paper focused on this specific and relevant topic. As an overall conclusion, this systematic literature review has revealed several important insights. The number of studies published varied over the years without an apparent pattern or trend, but it was possible to

note a considerable increase from 2019 to June 2022. The “Remote Sensing Journal” published most of the studies on this topic and the geographic location of the study areas showed that the continent with more case studies was Asia, with China being the most productive country in this field. The time range parameter showed that most papers analyzed more than 20 years of time span and regarding data sources, satellite imagery was used in most papers analyzed in this review. It is essential to consider the relevance of the historical data (e.g., land cover maps) in this analysis. This data source was mightily used and is relevant because it provides a baseline for understanding changes in LULC over time. By analyzing historical data, we can identify trends and patterns and evaluate the effectiveness of land management practices and policies. The multispectral data were extensively used in the analyzed papers. In contrast to multispectral data, the SAR data was hardly used. The SAR data can penetrate the clouds and measure the canopy trees, which is relevant for small oceanic islands because these areas face intense and recurrent cloud cover scenarios. Therefore, SAR data constitutes a high potential data type for LULC CD in oceanic islands and can be intensively explored in future studies. The most used sensors were from the Landsat Mission. This mission has provided open data acquired over half a century and supports this field’s most robust time series analysis. The NDVI was the most used remote sensing-based methodological. Regarding data processing algorithms, the MLCA and the RF are the ones the research community is putting more effort into. On the other hand, OA is the most applied accuracy assessment approach in this field. Most studies used RS data with 30 meters or higher spatial resolution. As oceanic islands are usually small territories, higher spatial resolution data can better distinguish between different LULC classes and consequently improve change detection. The main constraints identified in the analyzed papers include the non-existence of information in several articles regarding spatial resolution and the cloud coverage percentage of the RS data. Furthermore, most papers do not clarify which RS data preprocessing procedures were developed, namely atmospheric corrections. These parameters are critical and directly impact the accuracy and reliability of the results. They provide essential contextual information for the optimal use and interpretation of RS data, especially in insular contexts where the landscape and environmental conditions can be highly variable and complex, and LULC change can occur rapidly. This literature review has contributed to a deeper understanding of the complex remote sensing-based procedures used to detect LULC changes in coastal and insular areas. The

results of this review may have relevant implications in future studies in this field, as they clearly indicate the current leading practices and information gaps in these procedures, allowing for novel approaches to be developed, namely methodological frameworks using multi-sensor data (e.g., SAR, LiDAR, UAV) and Machine Learning-based data processing techniques to improve the accuracy and reliability of LULC change monitoring. These advanced approaches may provide more detailed, updated, and accurate information on LULC change, which is essential for supporting cost-effective decision-making and policy development.

CONTRIBUTION

Rafaela Tiengo: Methodology development, data collection and analysis, and manuscript writing.

Alicia Palácios-Orueta: Review of data analysis, work suggestions, and study advisor.

Jéssica Uchôa: Data collection, review of data analysis, and manuscript writing.

Artur Gil: Review of data analysis, work suggestions, and study advisor.

All authors contributed to the writing (reviewing and editing) of the manuscript.

REFERENCES

Abd El-Hamid, Hazem T. 2020. 'Geospatial Analyses for Assessing the Driving Forces of Land Use/Land Cover Dynamics Around the Nile Delta Branches, Egypt'. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 48 (12): 1661-74. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01189-2>.

Abdel-Hamid, Ayman, Olena Dubovyk, Islam Abou El-Magd, and Gunter Menz. 2018. 'Mapping Mangroves Extents on the Red Sea Coastline in Egypt Using Polarimetric SAR and High Resolution Optical Remote Sensing Data'. *Sustainability (Switzerland)* 10 (3): 1-22. <https://doi.org/10.3390/su10030646>.

Abdullah, Abu Yousuf Md, Arif Masrur, Mohammed Sarfaraz Gani Adnan, Md Abdullah Al Baky, Quazi K. Hassan, and Ashraf Dewan. 2019. 'Spatio-Temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in the Heterogeneous Coastal Region of Bangladesh between 1990 and 2017'. *Remote Sensing* 11 (7). <https://doi.org/10.3390/rs11070790>.

Abijith, Devanatham, and Subbarayan Saravanan. 2021. 'Assessment of Land Use and Land Cover Change Detection and Prediction Using Remote Sensing and CA Markov in the Northern Coastal Districts of Tamil Nadu, India'. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15782-6>.

Acción, Álvaro, Francisco Argüello, and Dora B. Heras. 2021. 'A New Multispectral Data Augmentation Technique Based on Data Imputation'. *Remote Sensing* 13 (23): 4875. <https://doi.org/10.3390/rs13234875>.

Ahmad, Asmala, S Quegan, and Shaun Quegan. 2012. 'Analysis of Maximum Likelihood Classification on Multispectral Data'. *Applied Mathematical Sciences*. Vol. 6. <https://www.researchgate.net/publication/279541271>.

Allen, M, P Antwi-Agyei, F Aragon-Durand, M Babiker, P Bertoldi, M Bind, S Brown, and M Buckeridge. 2019.

Alom, Ilia, Rose Paque, and Michiel Maertens. 2022. 'History of Land Cover Change on Santa Cruz Island, Galapagos'.

Austin, Keme G., Amanda Schwantes, Yaofeng Gu, and Prasad S. Kasibhatla. 2019. 'What Causes Deforestation in Indonesia?' *Environmental Research Letters* 14 (2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf6db>.

Ballanti, Laurel, Kristin B. Byrd, Isa Woo, and Christopher Ellings. 2017. 'Remote Sensing for Wetland Mapping and Historical Change Detection at the Nisqually River Delta'. *Sustainability (Switzerland)* 9 (11). <https://doi.org/10.3390/su9111919>.

Bell, Rose Anne, and J. Nikolaus Callow. 2020. 'Investigating Banksia Coastal Woodland Decline Using Multi-Temporal Remote Sensing and Field-Based Monitoring Techniques'. *Remote Sensing* 12 (4): 14-16. <https://doi.org/10.3390/rs12040669>.

Benítez, Fátima L., Carlos F. Mena, and Leo Zurita-Arthos. 2018. 'Urban Land Cover Change in Ecologically Fragile Environments: The Case of the Galapagos Islands'. *Land* 7 (1). <https://doi.org/10.3390/land7010021>.

Berberoglu, S., A. Akin, P. M. Atkinson, and P. J. Curran. 2010. 'Utilizing Image Texture to Detect Land-Cover Change in Mediterranean Coastal Wetlands'. *International Journal of Remote Sensing* 31 (11): 2793-2815. <https://doi.org/10.1080/01431160903111077>.

Bhatia, Nitin, and Graeme S. Cumming. 2020. 'Deforestation and Economic Growth Trends on Oceanic Islands Highlight the Need for Meso-Scale Analysis and Improved Mid-Range Theory in Conservation'. *Ecology and Society* 25 (3): 1-14. <https://doi.org/10.5751/ES-11713-250310>.

Breiman, Leo. 2001. 'Random Forests'. *Machine Learning* 45 (1): 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

Bremer, Leah L., Lisa Mandle, Clay Trauernicht, Pua'ala Pascua, Heather L. McMillen, Kimberly Burnett, Christopher A. Wada, et al., 2018. 'Bringing Multiple Values to the Table: Assessing Future Land-Use and Climate Change in North Kona, Hawai'i'. *Ecology and Society* 23 (1). <https://doi.org/10.5751/ES-09936-230133>.

Broich, Mark, Matthew Hansen, Fred Stolle, Peter Potapov, Belinda Arunawati Margono, and Bernard Adusei. 2011. 'Remotely Sensed Forest Cover Loss Shows High Spatial and Temporal Variation across Sumatera and Kalimantan, Indonesia 2000-2008'. *Environmental Research Letters* 6 (1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/014010>.

- Brown, Christopher F, Steven P Brumby, Brookie Guzder-williams, Tanya Birch, Samantha Brooks Hyde, Joseph Mazzariello, Wanda Czerwinski, *et al.*, 2022. 'Dynamic World , Near Real-Time Global 10 m Land Use Land Cover Mapping', 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>.
- Bruzzone, Lorenzo, and Francesca Bovolo. 2013. 'A Novel Framework for the Design of Change-Detection Systems for Very-High-Resolution Remote Sensing Images'. *Proceedings of the IEEE* 101 (3): 609-30. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2197169>.
- Bu, Lingxin, Quan Lai, Song Qing, Yuhai Bao, Xinyi Liu, Qin Na, and Yuan Li. 2022. 'Grassland Biomass Inversion Based on a Random Forest Algorithm and Drought Risk Assessment'. *Remote Sensing* 14 (22): 5745. <https://doi.org/10.3390/rs14225745>.
- Caballero, Isabel, Mar Roca, Juan Santos-echeand, and Patricia Bern. 2022. 'Use of the Sentinel-2 and Landsat-8 Satellites for Water Quality Monitoring : An Early Warning Tool in the Mar Menor Coastal Lagoon'.
- Calado, Helena, Ana Braga, Fabiana Moniz, Artur Gil, and Marta Vergílio. 2015. 'Spatial Planning and Resource Use in the Azores'. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20 (7): 1079-95. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9519-2>.
- Cardoso, Pedro, François Rigal, Simone Fattorini, Sofia Terzopoulou, and Paulo A.V. Borges. 2013. 'Integrating Landscape Disturbance and Indicator Species in Conservation Studies'. *PLoS ONE* 8 (5): 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063294>.
- Chamberlain, Debbie, Stuart Phinn, and Hugh Possingham. 2020. 'Remote Sensing of Mangroves and Estuarine Communities in Central Queensland, Australia'. *Remote Sensing* 12 (1). <https://doi.org/10.3390/RS12010197>.
- Chang, Ni-Bin, Min Han, Wei Yao, Liang-Chien Chen, and Shiguo Xu. 2010. 'Land Use and Land Cover Classification with SPOT-5 Images and Partial Lanczos Extreme Learning Machine (PL-ELM)'. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications* 7831: 783110. <https://doi.org/10.1117/12.863827>.
- Chen, Chao, Huixin Chen, Weimin Liao, Xinxin Sui, Liyan Wang, Jianyu Chen, and Yanli Chu. 2020. 'Dynamic Monitoring and Analysis of Land-Use and Land-Cover Change Using Landsat Multitemporal Data in the Zhoushan Archipelago, China'. *IEEE Access* 8: 210360-69. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036128>.
- Chen, Chi Farn, Nguyen Thanh Son, Ni Bin Chang, Cheng Ru Chen, Li Yu Chang, Miguel Valdez, Gustavo Centeno, Carlos Alberto Thompson, and Jorge Luis Aceituno. 2013. 'Multi-Decadal Mangrove Forest Change Detection and Prediction in Honduras, Central America, with Landsat Imagery and a Markov Chain Model'. *Remote Sensing* 5 (12): 6408-26. <https://doi.org/10.3390/rs5126408>.
- Chen, Dong, Yafei Wang, Zhenyu Shen, Jinfeng Liao, Jiezhi Chen, and Shaobo Sun. 2021. 'Long Time-Series Mapping and Change Detection of Coastal Zone Land Use Based on Google Earth Engine and Multi-Source Data Fusion'. *Remote Sensing* 14 (1): 1. <https://doi.org/10.3390/rs14010001>.
- Chen, Yu, Zutao Ming, and Massimo Menenti. 2020. 'Change Detection Algorithm for Multioral Remote Sensing Images Based on Adaptive Parameter Estimation'. *IEEE Access* 8: 106083-96. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993910>.
- Cohen, Jacob. 1960. 'A Coefficient of Agreement for Nominal Scales'. *Educational and Psychological Measurement* 20 (1): 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.
- Congalton, Russell G. 1991. 'A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data'. *Remote Sensing of Environment* 37 (1): 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B).
- Conti, Luis Américo, Carlos Alberto Sampaio de Araújo, and Marília Cunha-Lignon. 2016. 'Spatial Database Modeling for Mangrove Forests Mapping; Example of Two Estuarine Systems in Brazil'. *Modeling Earth Systems and Environment* 2 (2). <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0129-3>.
- Dang, An T.N., Lalit Kumar, Michael Reid, and Ho Nguyen. 2021. 'Remote Sensing Approach for Monitoring Coastal Wetland in the Mekong Delta, Vietnam: Change Trends and Their Driving Forces'. *Remote Sensing* 13 (17). <https://doi.org/10.3390/rs13173359>.
- Dang, Kinh Bac, Manh Ha Nguyen, Duc Anh Nguyen, Thi Thanh Hai Phan, Tuan Linh Giang, Hoang Hai Pham, Thu Nhung Nguyen, Thi Thuy Van Tran, and Dieu Tien Bui. 2020. 'Coastal Wetland Classification with Deep U-Net Convolutional Networks and Sentinel-2 Imagery: A Case Study at the Tien Yen Estuary of Vietnam'. *Remote Sensing* 12 (19): 1-26. <https://doi.org/10.3390/rs12193270>.
- Davis, Dylan S., and Kristina Douglass. 2021. 'Remote Sensing Reveals Lasting Legacies of Land-Use by Small-Scale Foraging Communities in the Southwestern Indian Ocean'. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9 (September): 1-14. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.689399>.
- Delevaux, Jade M.S., and Kostantinos A. Stamoulis. 2022. 'Prioritizing Forest Management Actions to Benefit Marine Habitats in Data-Poor Regions'. *Conservation Biology* 36 (2): 1-12. <https://doi.org/10.1111/cobi.13792>.
- Desheng Liu, and Fan Xia. 2010. 'Assessing Object-Based Classification: Advantages and Limitations'. *Remote Sensing Letters* 1 (December): 187-94.
- Dewi, Ratna Sari, and Wietske Bijker. 2020. 'Dynamics of Shoreline Changes in the Coastal Region of Sayung, Indonesia'. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 23 (2): 181-93. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.09.001>.
- Ding, Zhi, Xiaohan Liao, Fenzhen Su, and Dongjie Fu. 2017. 'Mining Coastal Land Use Sequential Pattern and Its Land Use Associations Based on Association Rule Mining'. *Remote Sensing* 9 (2): 116. <https://doi.org/10.3390/rs9020116>.
- Ding, Zhi, Fenzhen Su, Junjue Zhang, Yu Zhang, Shuchang Luo, and Xuguang Tang. 2019. 'Clustering Coastal Land Use Sequence Patterns

- along the Sea-Land Direction: A Case Study in the Coastal Zone of Bohai Bay and the Yellow River Delta, China'. *Remote Sensing* 11 (17). <https://doi.org/10.3390/rs11172024>.
- Du, Peijun, Pei Liu, Junshi Xia, Li Feng, Sicong Liu, Kun Tan, and Liang Cheng. 2014. 'Remote Sensing Image Interpretation for Urban Environment Analysis: Methods, System and Examples'. *Remote Sensing* 6 (10): 9458–74. <https://doi.org/10.3390/rs6109458>.
- Dusseux, Pauline, Thomas Corpetti, Laurence Hubert-Moy, and Samuel Corgne. 2014. 'Combined Use of Multi-Temporal Optical and Radar Satellite Images for Grassland Monitoring'. *Remote Sensing* 6 (7): 6163–82. <https://doi.org/10.3390/rs6076163>.
- Elamin, Ahmed, and Ahmed El-Rabbany. 2022. 'UAV-Based Multi-Sensor Data Fusion for Urban Land Cover Mapping Using a Deep Convolutional Neural Network'. *Remote Sensing* 14 (17): 4298. <https://doi.org/10.3390/rs14174298>.
- Elhag, Mohamed, and Silvena Boteva. 2020. 'Quantitative Analysis of Different Environmental Factor Impacts on Land Cover in Nisos Elafonisos, Crete, Greece'. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (18): 1–17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186437>.
- El-Hamid, Hazem T. Abd, Hoda Nour-Eldin, Nazih Y. Rebouh, and Ahmed M. El-Zeiny. 2022. 'Past and Future Changes of Land Use/Land Cover and the Potential Impact on Ecosystem Services Value of Damietta Governorate, Egypt'. *Land* 11 (12): 2169. <https://doi.org/10.3390/land11122169>.
- El-Hattab, Mamdouh M. 2016. 'Applying Post Classification Change Detection Technique to Monitor an Egyptian Coastal Zone (Abu Qir Bay)'. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 19 (1): 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.02.002>.
- Elmahdy, Samy, Mohamed Mohamed, and Tarig Ali. 2020. 'Land Use/Land Cover Changes Impact on Groundwater Level and Quality in the Northern Part of the United Arab Emirates'. *Remote Sensing* 12 (11). <https://doi.org/10.3390/rs12111715>.
- Fauzi, Adam, Anjar Sakti, Lissa Yayusman, Agung Harto, Lilik Prasetyo, Bambang Irawan, Muhammad Kamal, and Ketut Wikantika. 2019. 'Contextualizing Mangrove Forest Deforestation in Southeast Asia Using Environmental and Socio-Economic Data Products'. *Forests* 10 (11): 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10110952>.
- Ferrarini, Alessandro, Marco Gustin, and Claudio Celada. 2021. 'Twenty-Three Years of Land-Use Changes Induced Considerable Threats to the Main Wetlands of Sardinia and Sicily (Italy) along the Mediterranean Bird Flyways'. *Diversity* 13 (6). <https://doi.org/10.3390/d13060240>.
- Ferreira, Maria Adelaide, Francisco Andrade, Ricardo Nogueira Mendes, and José Paula. 2012. 'Use of Satellite Remote Sensing for Coastal Conservation in the Eastern African Coast: Advantages and Shortcomings'. *European Journal of Remote Sensing* 45 (1): 293–304. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20124526>.
- Filipponi, Federico, Emiliana Valentini, Alessandra Nguyen Xuan, Carlos A. Guerra, Florian Wolf, Martin Andrzejak, and Andrea Taramelli. 2018. 'Global MODIS Fraction of Green Vegetation Cover for Monitoring Abrupt and Gradual Vegetation Changes'. *Remote Sensing* 10 (4). <https://doi.org/10.3390/rs10040653>.
- Foody, Giles M. 2002. 'Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment'. *Remote Sensing of Environment* 80 (1): 185–201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4).
- Gameiro, Samuel, Victor Nascimento, Douglas Facco, Giuliana Sfredo, and Jean Ometto. 2022. 'Multitemporal Spatial Analysis of Land Use and Land Cover Changes in the Lower Jaguaribe Hydrographic Sub-Basin, Ceará, Northeast Brazil'. *Land* 11 (1). <https://doi.org/10.3390/land11010103>.
- Gao, Bo-cai. 1996. 'NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space'. *Remote Sensing of Environment* 58 (3): 257–66. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
- García-Romero, Leví, Antonio I. Hernández-Cordero, Elisabeth Fernández-Cabrera, Carolina Peña-Alonso, Luis Hernández-Calvento, and Emma Pérez-Chacón. 2016. 'Urban-Touristic Impacts on the Aeolian Sedimentary Systems of the Canary Islands: Conflict between Development and Conservation'. *Island Studies Journal* 11 (1): 91–112. <https://doi.org/10.24043/isj.336>.
- Gevana, Dixon, Leni Camacho, Antonio Carandang, Sofronio Camacho, and Sangjun Im. 2015. 'Land Use Characterization and Change Detection of a Small Mangrove Area in Banacon Island, Bohol, Philippines Using a Maximum Likelihood Classification Method'. *Forest Science and Technology* 11 (4): 197–205. <https://doi.org/10.1080/21580103.2014.996611>.
- Gil, Artur, Catarina Fonseca, and José Benedicto-Royuela. 2018. 'Land Cover Trade-Offs in Small Oceanic Islands: A Temporal Analysis of Pico Island, Azores'. *Land Degradation & Development* 29 (2): 349–60. <https://doi.org/10.1002/ldr.2770>.
- Gil, Artur, Catarina Fonseca, Agustín Lobo, and Helena Calado. 2012. 'Linking GMES Space Component to the Development of Land Policies in Outermost Regions - The Azores (Portugal) Case-Study'. *European Journal of Remote Sensing* 45 (1): 263–81. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20124524>.
- Gil, Artur, Qian Yu, Mohamed Abadi, and Helena Calado. 2014. 'Using Aster Multispectral Imagery for Mapping Woody Invasive Species in Pico Da Vara Natural Reserve (Azores Islands, Portugal)'. *Revista Árvore* 38 (3): 391–401. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300001>.
- Giza, Andrzej, Paweł Terefenko, Tomasz Komorowski, and Paweł Czapliński. 2021. 'Determining Long-Term Land Cover Dynamics in the South Baltic Coastal Zone from Historical Aerial Photographs'. *Remote Sensing* 13 (6): 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs13061068>.

- Gray, Patrick Clifton, Diego F. Chamorro, Justin T. Ridge, Hannah Rae Kerner, Emily A. Ury, and David W. Johnston. 2021. 'Temporally Generalizable Land Cover Classification: A Recurrent Convolutional Neural Network Unveils Major Coastal Change through Time'. *Remote Sensing* 13 (19). <https://doi.org/10.3390/rs13193953>.
- Grybas, Heather, Russell G. Congalton, and Andrew F. Howard. 2020. 'Using Geospatial Analysis to Map Forest Change in New Hampshire: 1996-Present'. *Journal of Forestry* 118 (6): 598-612. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvaa039>.
- Guan, Yuwei, Yanru Zhou, Binbin He, Xiangzhuo Liu, Hongguo Zhang, and Shilei Feng. 2020. 'Improving Land Cover Change Detection and Classification with BRDF Correction and Spatial Feature Extraction Using Landsat Time Series: A Case of Urbanization in Tianjin, China'. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13: 4166-77. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3007562>.
- Guerrero Tello, José Francisco, Mauro Coltelli, Maria Marsella, Angela Celauro, and José Antonio Palenzuela Baena. 2022. 'Convolutional Neural Network Algorithms for Semantic Segmentation of Volcanic Ash Plumes Using Visible Camera Imagery'. *Remote Sensing* 14 (18): 4477. <https://doi.org/10.3390/rs14184477>.
- Guo, Tianci, Tao He, Shunlin Liang, Jean Louis Roujean, Yuyu Zhou, and Xin Huang. 2022. 'Multi-Decadal Analysis of High-Resolution Albedo Changes Induced by Urbanization over Contrasted Chinese Cities Based on Landsat Data'. *Remote Sensing of Environment* 269: 112832. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112832>.
- Hafyani, Mohammed El, Ali Essahlaoui, Anton Van Rompaey, Meriame Mohajane, Abdellah El Hmaid, Abdelhadi El Ouali, Fouad Moudden, and Nour Eddine Serrhini. 2020. 'Assessing Regional Scale Water Balances through Remote Sensing Techniques: A Case Study of Boufakrane River Watershed, Meknes Region, Morocco'. *Water (Switzerland)* 12 (2). <https://doi.org/10.3390/w12020320>.
- Hamylton, Sarah, and Holly East. 2012. 'A Geospatial Appraisal of Ecological and Geomorphic Change on Diego Garcia Atoll, Chagos Islands (British Indian Ocean Territory)'. *Remote Sensing* 4 (11): 3444-61. <https://doi.org/10.3390/rs4113444>.
- Haris, Nurul Afdal, Sandiaga Swahyu Kusuma, Sanjiwana Arjasakusuma, and Pramaditya Wicaksono. 2021. 'Comparison of Sentinel-2 and Multitemporal Sentinel-1 SAR Imagery for Mapping Aquaculture Pond Distribution in the Coastal Region of Brebes Regency, Central Java, Indonesia'. *Geographia Technica*, no. Special Issue (September): 128-37. https://doi.org/10.21163/GT_2021.163.10.
- Hasan, Sarah, Wenzhong Shi, Xiaolin Zhu, and Sawaid Abbas. 2019. 'Monitoring of Land Use/Land Cover and Socioeconomic Changes in South China over the Last Three Decades Using Landsat and Nighttime Light Data'. *Remote Sensing* 11 (14): 1658. <https://doi.org/10.3390/rs11141658>.
- Hemati, Mohammadali, Mahdi Hasanlou, Masoud Mahdianpari, and Fariba Mohammadimanesh. 2021. 'A Systematic Review of Landsat Data for Change Detection Applications: 50 Years of Monitoring the Earth'. *Remote Sensing* 13 (15). <https://doi.org/10.3390/rs13152869>.
- Hernández, William J., Julio M. Morell, and Roy A. Armstrong. 2022. 'Using High-Resolution Satellite Imagery to Assess the Impact of Sargassum Inundation on Coastal Areas'. *Remote Sensing Letters* 13 (1): 24-34. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1981558>.
- Hilgendorf, Zach, M. Colin Marvin, Craig M. Turner, and Ian J. Walker. 2021. 'Assessing Geomorphic Change in Restored Coastal Dune Ecosystems Using a Multi-Platform Aerial Approach'. *Remote Sensing* 13 (3): 1-34. <https://doi.org/10.3390/rs13030354>.
- Hong, Huynh Thi Cam, Ram Avtar, and Masahiko Fujii. 2019. 'Monitoring Changes in Land Use and Distribution of Mangroves in the Southeastern Part of the Mekong River Delta, Vietnam'. *Tropical Ecology* 60 (4): 552-65. <https://doi.org/10.1007/s42965-020-00053-1>.
- Hou, Wan, and Xiyong Hou. 2019. 'Data Fusion and Accuracy Analysis of Multi-Source Land Use/Land Cover Datasets along Coastal Areas of the Maritime Silk Road'. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8 (12). <https://doi.org/10.3390/ijgi8120557>.
- Howison, Ruth A., Theunis Piersma, Rosemarie Kentie, Jos C.E.W. Hooijmeijer, and Han Olf. 2018. 'Quantifying Landscape-Level Land-Use Intensity Patterns through Radar-Based Remote Sensing'. *Journal of Applied Ecology* 55 (3): 1276-87. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13077>.
- Hua, Lizhong, Xinxin Zhang, Xi Chen, Kai Yin, and Lina Tang. 2017. 'A Feature-Based Approach of Decision Tree Classification to Map Time Series Urban Land Use and Land Cover with Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI in a Coastal City, China'. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6 (11): 1-18. <https://doi.org/10.3390/ijgi6110331>.
- Huete, A, K Didan, T Miura, E.P Rodriguez, X Gao, and L.G Ferreira. 2002. 'Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices'. *Remote Sensing of Environment* 83 (1-2): 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- Huete, A.R. 1988. 'A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)'. *Remote Sensing of Environment* 25 (3): 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- Ibarrola-Ulzurrun, Edurne, Javier Marcello, Consuelo Gonzalo-Martín, and José Luis Martín-Esquivel. 2019. 'Temporal Dynamic Analysis of a Mountain Ecosystem Based on Multi-Source and Multi-Scale Remote Sensing Data'. *Ecosphere* 10 (6). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2708>.
- Jolliffe, Ian T., and Jorge Cadima. 2016. 'Principal Component Analysis: A Review and Recent Developments'. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374 (2065): 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>.

- Kacic, Patrick, and Claudia Kuenzer. 2022. 'Forest Biodiversity Monitoring Based on Remotely Sensed Spectral Diversity—A Review'. *Remote Sensing* 14 (21): 5363. <https://doi.org/10.3390/rs14215363>.
- Kaiser, G., B. Burkhard, H. Römer, S. Sangkaew, R. Graterol, T. Haitook, H. Sterr, and D. Sakuna-Schwartz. 2013. 'Mapping Tsunami Impacts on Land Cover and Related Ecosystem Service Supply in Phang Nga, Thailand'. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (12): 3095–3111. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3095-2013>.
- Kattenborn, Teja, Jana Eichel, and Fabian Ewald Fassnacht. 2019. 'Convolutional Neural Networks Enable Efficient, Accurate and Fine-Grained Segmentation of Plant Species and Communities from High-Resolution UAV Imagery'. *Scientific Reports* 9 (1): 17656. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53797-9>.
- Kefalas, George, Konstantinos Poirazidis, Panteleimon Xofis, and Stamatis Kalogirou. 2018. 'Mapping and Understanding the Dynamics of Landscape Changes on Heterogeneous Mediterranean Islands with the Use of OBIA: The Case of Ionian Region, Greece'. *Sustainability (Switzerland)* 10 (9). <https://doi.org/10.3390/su10092986>.
- Lambin, E.F. 2001. 'Remote Sensing and Geographic Information Systems Analysis'. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 13150–55. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/04200-5>.
- Li, Humei, Mingquan Wu, Dinghui Tian, Lianxi Wu, and Zheng Niu. 2019. 'Monitoring and Analysis of the Expansion of the Ajmr Port, Davao City, Philippines Using Multi-Source Remote Sensing Data'. *PeerJ* 2019 (8): 1–23. <https://doi.org/10.7717/peerj.7512>.
- Li, Peng, Zhenhong Li, Keren Dai, Yasir Al-Husseinawi, Wanpeng Feng, and Houjie Wang. 2021. 'Reconstruction and Evaluation of DEMs from Bistatic Tandem-X SAR in Mountainous and Coastal Areas of China'. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 14: 5152–70. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3073782>.
- Lin, Qingying, Jinyun Guo, Jinfeng Yan, and Wang Heng. 2018. 'Land Use and Landscape Pattern Changes of Weihai, China Based on Object-Oriented SVM Classification from Landsat MSS/TM/OLI Images'. *European Journal of Remote Sensing* 51 (1): 1036–48. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1534532>.
- Lira, C., M. Lousada, A. P. Falcão, A. B. Gonçalves, S. Heleno, M. Matias, M. J. Pereira, *et al.*, 2013. 'The 20 February 2010 Madeira Island Flash-Floods: VHR Satellite Imagery Processing in Support of Landslide Inventory and Sediment Budget Assessment'. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (3): 709–19. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-709-2013>.
- Liu, Manqing, and Deyong Hu. 2019. 'Response of Wetland Evapotranspiration to Land Use/Cover Change and Climate Change in Liaohe River Delta, China'. *Water (Switzerland)* 11 (5). <https://doi.org/10.3390/w11050955>.
- Lopac, Nikola, Irena Jurdana, Adrian Brnelić, and Tomislav Krljan. 2022. 'Application of Laser Systems for Detection and Ranging in the Modern Road Transportation and Maritime Sector'. *Sensors* 22 (16): 5946. <https://doi.org/10.3390/s22165946>.
- Lymburner, Leo, Peter Bunting, Richard Lucas, Peter Scarth, Imam Alam, Claire Phillips, Catherine Ticehurst, and Alex Held. 2020. 'Mapping the Multi-Decadal Mangrove Dynamics of the Australian Coastline'. *Remote Sensing of Environment* 238 (March 2019): 111185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.004>.
- Lyons, Mitchell, Stuart Phinn, and Chris Roelfsema. 2011. 'Integrating Quickbird Multi-Spectral Satellite and Field Data: Mapping Bathymetry, Seagrass Cover, Seagrass Species and Change in Moreton Bay, Australia in 2004 and 2007'. *Remote Sensing* 3 (1): 42–64. <https://doi.org/10.3390/rs3010042>.
- Ma, Chunlei, Bin Ai, Jun Zhao, Xiaoping Xu, and Wei Huang. 2019. 'Change Detection of Mangrove Forests in Coastal Guangdong during the Past Three Decades Based on Remote Sensing Data'. *Remote Sensing* 11 (8): 921. <https://doi.org/10.3390/rs11080921>.
- Machidon, Alina L., Fabio del Frate, Matteo Picchiani, Octavian M. Machidon, and Petre L. Ogrutan. 2020. 'Geometrical Approximated Principal Component Analysis for Hyperspectral Image Analysis'. *Remote Sensing* 12 (11): 1698. <https://doi.org/10.3390/rs12111698>.
- Magolan, Jessica Lynn, and Joanne Nancie Halls. 2020. 'A Multi-Decadal Investigation of Tidal Creek Wetland Changes, Water Level Rise, and Ghost Forests'. *Remote Sensing* 12 (7). <https://doi.org/10.3390/rs12071141>.
- Marlier, Miriam E., Ruth S. DeFries, Patrick S. Kim, Shannon N. Koplitz, Daniel J. Jacob, Loretta J. Mickley, and Samuel S. Myers. 2015. 'Fire Emissions and Regional Air Quality Impacts from Fires in Oil Palm, Timber, and Logging Concessions in Indonesia'. *Environmental Research Letters* 10 (8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/085005>.
- Mathodi, Botlhe, Piet K. Kenabatho, Bhagabat P. Parida, and Joyce G. Maphanyane. 2019. 'Evaluating Land Use and Land Cover Change in the Gaborone Dam Catchment, Botswana, from 1984–2015 Using GIS and Remote Sensing'. *Sustainability (Switzerland)* 11 (19). <https://doi.org/10.3390/su11195174>.
- Mccarthy, Matthew J., Brita Jessen, Michael J. Barry, Marissa Figueroa, Jessica Mcintosh, Tylar Murray, Jill Schmid, and Frank E. Muller-Karger. 2020. 'Automated High-Resolution Time Series Mapping of Mangrove Forests Damaged by Hurricane Irma in Southwest Florida'. *Remote Sensing* 12 (11). <https://doi.org/10.3390/rs12111740>.
- Meilianda, Ella, Biswajeet Pradhan, Syamsidik, Louise K. Comfort, Dedy Alfian, Romy Juanda, S. Syahreza, and Khairul Munadi. 2019. 'Assessment of Post-Tsunami Disaster Land Use/Land Cover Change and Potential Impact of Future Sea-Level Rise to Low-Lying Coastal Areas: A Case Study of Banda Aceh Coast of Indonesia'. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 41 (August): 101292. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101292>.

- Miranda, Vasco, Pedro Pina, Sandra Heleno, Gonalo Vieira, Carla Mora, and Carlos E.G.R. Schaefer. 2020. 'Monitoring Recent Changes of Vegetation in Fildes Peninsula (King George Island, Antarctica) through Satellite Imagery Guided by UAV Surveys'. *Science of the Total Environment* 704: 135295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135295>.
- Morgan, Grayson R., Cuizhen Wang, Zhenlong Li, Steven R. Schill, and Daniel R. Morgan. 2022. 'Deep Learning of High-Resolution Aerial Imagery for Coastal Marsh Change Detection: A Comparative Study'. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 11 (2). <https://doi.org/10.3390/ijgi11020100>.
- Mouat, D.A, G.G Mahin, and J Lancaster. 1993. 'Remote Sensing Techniques in the Analysis of Change Detection'. *Geocarto International*, 39–50.
- Muro, Javier, Morton Canty, Knut Conradsen, Christian Hüttich, Allan Aasbjerg Nielsen, Henning Skriver, Florian Remy, Adrian Strauch, Frank Thonfeld, and Gunter Menz. 2016. 'Short-Term Change Detection in Wetlands Using Sentinel-1 Time Series'. *Remote Sensing* 8 (10): 1–14. <https://doi.org/10.3390/rs8100795>.
- Newman, Rebecca Jo Stormes, Claudia Capitani, Colin Courtney-Mustaphi, Jessica Paula Rose Thorn, Rebecca Kariuki, Charis Enns, and Robert Marchant. 2020. 'Integrating Insights from Social-Ecological Interactions into Sustainable Land Use Change Scenarios for Small Islands in The western Indian Ocean'. *Sustainability (Switzerland)* 12 (4): 1–22. <https://doi.org/10.3390/su12041340>.
- Nguyen, Giang Cong, Khac Vu Dang, Tuan Anh Vu, Anh Khac Nguyen, and Christiane Weber. 2022. 'Ha Long–Cam Pha Cities Evolution Analysis Utilizing Remote Sensing Data'. *Remote Sensing* 14 (5): 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs14051241>.
- Nguyen, Hai Hoa, Lan Thi Ngoc Tran, An Thanh Le, Nghia Huu Nghia, Linh Vo Khanh Duong, Hien Thi Thu Nguyen, Simone Bohm, and Charles Finny Sathya Premnath. 2020. 'Monitoring Changes in Coastal Mangrove Extents Using Multi-Temporal Satellite Data in Selected Communes, Hai Phong City, Vietnam'. *Forest and Society* 4 (1): 256–70. <https://doi.org/10.24259/fs.v4i1.8486>.
- Nguyen, Long Duc, Cuong Trong Nguyen, Hoa Sy Le, and Bao Quang Tran. 2019. 'Mangrove Mapping and Above-Ground Biomass Change Detection Using Satellite Images in Coastal Areas of Thai Binh Province, Vietnam'. *Forest and Society* 3 (2): 248–61. <https://doi.org/10.24259/fs.v3i2.7326>.
- Nong, Duong H., An T. Ngo, Hoa P.T. Nguyen, Thuy T. Nguyen, Lan T. Nguyen, and Summet Saksena. 2021. 'Changes in Coastal Agricultural Land Use in Response to Climate Change: An Assessment Using Satellite Remote Sensing and Household Survey Data in Tien Hai District, Thai Binh Province, Vietnam'. *Land* 10 (6). <https://doi.org/10.3390/land10060627>.
- Norder, Sietze J., Ricardo F. de Lima, Lea de Nascimento, Jun Y. Lim, José María Fernández-Palacios, Maria M. Romeiras, Rui Bento Elias, *et al.*, 2020. 'Global Change in Microcosms: Environmental and Societal Predictors of Land Cover Change on the Atlantic Ocean Islands'. *Anthropocene* 30. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100242>.
- Okwuashi, Onuwa, Mfon Isong, Etim Eyo, Aniekan Eyoh, Okey Nwanekezie, Dupe Nihinlola Olayinka, Daniel Okon Udoudo, and Beulah Ofem. 2012. 'GIS Cellular Automata Using Artificial Neural Network for Land Use Change Simulation of Lagos, Nigeria'. *Journal of Geography and Geology*, May. <https://doi.org/10.5539/jgg.v4n2p94>.
- Oliveira, Eduardo R., Leonardo Disperati, and Fátima L. Alves. 2021. A New Method (Minded-Ba) for Automatic Detection of Burned Areas Using Remote Sensing. *Remote Sensing*, Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/rs13245164>.
- Oliveira, Eduardo R., Leonardo Disperati, Luca Cenci, Luísa Gomes Pereira, and Fátima L. Alves. 2019. 'Multi-Index Image Differencing Method (MINDED) for Flood Extent Estimations'. *Remote Sensing* 11 (11): 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs11111305>.
- Palacio-Aponte, Gerardo. 2014. 'Land Cover Modification Geoinicator Applied in a Tropical Coastal Environment'. *Revista de Biología Tropical* 62 (3): 1111–28. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.12215>.
- Panuju, Dyah R., David J. Paull, and Amy L. Griffin. 2020. 'Change Detection Techniques Based on Multispectral Images for Investigating Land Cover Dynamics'. *Remote Sensing* 12 (11): 1781. <https://doi.org/10.3390/rs12111781>.
- Patel, Nilanchal, and Brijesh Kaushal. 2010. 'Improvement of User's Accuracy through Classification of Principal Component Images and Stacked Temporal Images'. *Geo-Spatial Information Science* 13 (4): 243–48. <https://doi.org/10.1007/s11806-010-0380-0>.
- Pelage, Latifa, Gilles Domalain, Alex S. Lira, Paulo Travassos, and Thierry Frédo. 2019. 'Coastal Land Use in Northeast Brazil: Mangrove Coverage Evolution Over Three Decades'. *Tropical Conservation Science* 12. <https://doi.org/10.1177/1940082918822411>.
- Peng, Jianwei, Shuguang Liu, Weizhi Lu, Maochou Liu, Shuailong Feng, and Pifu Cong. 2021. 'Continuous Change Mapping to Understand Wetland Quantity and Quality Evolution and Driving Forces: A Case Study in the Liao River Estuary from 1986 to 2018'. *Remote Sensing* 13 (23). <https://doi.org/10.3390/rs13234900>.
- Pervez, Wasim, Vali Uddin, Shoab Ahmad Khan, and Junaid Aziz Khan. 2016. 'Satellite-Based Land Use Mapping: Comparative Analysis of Landsat-8, Advanced Land Imager, and Big Data Hyperion Imagery'. *Journal of Applied Remote Sensing* 10 (2): 026004. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.10.026004>.
- Pirowski, Tomasz, Bartłomiej Szypuła, and Michał Marciak. 2022. 'Interpretation of Multispectral Satellite Data as a Tool for Detecting Archaeological Artifacts (Navkur Plain and Karamleis Plain, Iraq)'. *Archaeological and Anthropological Sciences* 14 (9): 166. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01637-9>.

- Qiu, Shuangshuang, Wenze Yue, Huan Zhang, and Jianguo Qi. 2017. 'Island Ecosystem Services Value, Land-Use Change, and the National New Area Policy in Zhoushan Archipelago, China'. *Island Studies Journal* 12 (2): 177–98. <https://doi.org/10.24043/isj.20>.
- Shivakumar, and Rajashekararadhya. 2018. 'An Investigation on Land Cover Mapping Capability of Classical and Fuzzy Based Maximum Likelihood Classifiers'. *International Journal of Engineering & Technology* 7 (2): 939. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.10743>.
- Radke, R.J., S. Andra, O. Al-Kofahi, and B. Roysam. 2005. 'Image Change Detection Algorithms: A Systematic Survey'. *IEEE Transactions on Image Processing* 14 (3): 294–307. <https://doi.org/10.1109/TIP.2004.838698>.
- Rahman, Muhammad Tauhidur. 2016. 'Detection of Land Use/Land Cover Changes and Urban Sprawl in Al-Khobar, Saudi Arabia: An Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Data'. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5 (2). <https://doi.org/10.3390/ijgi5020015>.
- Ramjeawon, Manish, Molla Demlie, Michele L. Toucher, and Susan Janse van Rensburg. 2020. 'Analysis of Three Decades of Land Cover Changes in the Maputaland Coastal Plain, South Africa'. *Koedoe* 62 (1): 1–12. <https://doi.org/10.4102/koedoe.v62i1.1642>.
- Rapinel, Sébastien, Bernard Clément, Sylvie Magnanon, Vanessa Sellin, and Laurence Hubert-Moy. 2014. 'Identification and Mapping of Natural Vegetation on a Coastal Site Using a Worldview-2 Satellite Image'. *Journal of Environmental Management* 144: 236–46. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.027>.
- Raynolds, Martha K., and Donald A. Walker. 2016. 'Increased Wetness Confounds Landsat-Derived NDVI Trends in the Central Alaska North Slope Region, 1985-2011'. *Environmental Research Letters* 11 (8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/085004>.
- Rembold, Felix, Michele Meroni, Ferdinando Urbano, Antoine Royer, Clement Atzberger, Guido Lemoine, Herman Eerens, and Dominique Haesen. 2015. 'Remote Sensing Time Series Analysis for Crop Monitoring with the SPIRITS Software: New Functionalities and Use Examples'. *Frontiers in Environmental Science* 3 (July). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00046>.
- Ren, Zhouqiao, Wanxin Zhan, Qiaobing Yue, and Jianhua He. 2020. 'Prioritizing Agricultural Patches for Reforestation to Improve Connectivity of Habitat Conservation Areas: A Guide to Grain-to-Green Project'. *Sustainability (Switzerland)* 12 (21): 1–17. <https://doi.org/10.3390/su12219128>.
- Révillion, Christophe, Artadji Attoumane, and Vincent Herbreteau. 2019. 'Homisland-lo: Homogeneous Land Use/Land Cover over the Small Islands of the Indian Ocean'. *Data* 4 (2): 1–10. <https://doi.org/10.3390/data4020082>.
- Richards, John A. 2013. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Edited by John A. Richards. 5th, 494p ed. Vol. 978-3-642-30062-2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>.
- Rietbergen, Simon, Tom Hammond, Chucri Sayegh, Frits Hesselink, and Kieran Mooney. 2007. 'Island Voices-Island Choices Developing Strategies for Living with Rapid Ecosystem Change in Small Islands World Headquarters International Union for Conservation of Nature Ecosystem Management Series No. 6. IUCN. 40pp.
- Roy, Parth Sarathi, Reshma M. Ramachandran, Oscar Paul, Praveen K. Thakur, Shirish Ravan, Mukunda Dev Behera, Chandan Sarangi, and Vijay P. Kanawade. 2022. 'Anthropogenic Land Use and Land Cover Changes—A Review on Its Environmental Consequences and Climate Change'. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01569-w>.
- Rwanga, Sophia S., and J. M. Ndambuki. 2017. 'Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS'. *International Journal of Geosciences* 08 (04): 611–22. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>.
- Saffache, P, and P Angelelli. 2010. 'Integrated Coastal Zone Management in Small Islands: A Comparative Outline of Some Islands of the Lesser Antilles'. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 255–79.
- Saikia, Lalit, Chandan Mahanta, Abhijit Mukherjee, and Suranjana Bhaswati Borah. 2019. 'Erosion-Deposition and Land Use/Land Cover of the Brahmaputra River in Assam, India'. *Journal of Earth System Science* 128 (8). <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1233-3>.
- Salgueiro, Luis, Javier Marcello, and Verónica Vilaplana. 2021. 'Single-Image Super-Resolution of Sentinel-2 Low Resolution Bands with Residual Dense Convolutional Neural Networks'. *Remote Sensing* 13 (24): 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs13245007>.
- Sanchez, Antonio, Dania Abdul Malak, Anis Guelmami, and Christian Perennou. 2015. 'Development of an Indicator to Monitor Mediterranean Wetlands'. *PLoS ONE* 10 (3): 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122694>.
- Sarkis-Onofre, Rafael, Ferrán Catalá-López, Edoardo Aromataris, and Craig Lockwood. 2021. 'How to Properly Use the PRISMA Statement'. *Systematic Reviews* 10 (1): 117. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>.
- Schubert, Henry, Markus Rauchecker, Andrés Caballero Calvo, and Brigitta Schütt. 2019. 'Land Use Changes and Their Perception in the Hinterland of Barranquilla, Colombian Caribbean'. *Sustainability (Switzerland)* 11 (23): 1–21. <https://doi.org/10.3390/su11236729>.
- Shapiro, Aurélie, Carl Trettin, Helga Küchly, Sadroddin Alavinapanah, and Salomão Bandeira. 2015. 'The Mangroves of the Zambezi Delta: Increase in Extent Observed via Satellite from 1994 to 2013'. *Remote Sensing* 7 (12): 16504–18. <https://doi.org/10.3390/rs71215838>.
- Singh, Ashbindu. 1989. 'Review Article Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data'. *International Journal of Remote Sensing* 10 (6): 989–1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>.

- Singh, RG, J Engelbrecht, and J Kemp. 2015. 'Change Detection of Bare Areas in the Xolobeni Region, South Africa Using Landsat NDVI.' *South African Journal of Geomatics* 4 (2): 138. <https://doi.org/10.4314/sajg.v4i2.6>.
- Sunwoo, Wooyeon, Hoang Hai Nguyen, and Minha Choi. 2018. 'Coastal Wetland Change Detection Using High Spatial Resolution KOMPSAT-2 Imagery'. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 29 (5): 509-21. <https://doi.org/10.3319/TAO.2018.05.18.01>.
- Swartz, Martha Kirk. 2011. 'The PRISMA Statement: A Guideline for Systematic Reviews and Meta-Analyses'. *Journal of Pediatric Health Care* 25 (1): 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.pedhc.2010.09.006>.
- Tassi, Andrea, and Artur Gil. 2020. 'A Low-Cost Sentinel-2 Data and Rao's Q Diversity Index-Based Application for Detecting, Assessing and Monitoring Coastal Land-Cover/Land-Use Changes at High Spatial Resolution'. *Journal of Coastal Research* 95 (sp1): 1315-19. <https://doi.org/10.2112/SI95-253.1>.
- Thapa, Pawan. 2022. 'The Relationship between Land Use and Climate Change: A Case Study of Nepal'. In *The Nature, Causes, Effects and Mitigation of Climate Change on the Environment*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98282>.
- Tran, Hanh, Thuc Tran, and Matthieu Kervyn. 2015. 'Dynamics of Land Cover/Land Use Changes in the Mekong Delta, 1973-2011: A Remote Sensing Analysis of the Tran Van Thoi District, Ca Mau Province, Vietnam'. *Remote Sensing* 7 (3): 2899-2925. <https://doi.org/10.3390/rs70302899>.
- Tran, Hoa Thi, James B. Campbell, Randolph H. Wynne, Yang Shao, and Son Viet Phan. 2019. 'Drought and Human Impacts on Land Use and Land Cover Change in a Vietnamese Coastal Area'. *Remote Sensing* 11 (3): 1-23. <https://doi.org/10.3390/rs11030333>.
- Tu, Ying, Bin Chen, Wei Lang, Tingting Chen, Miao Li, Tao Zhang, and Bing Xu. 2021. 'Uncovering the Nature of Urban Land Use Composition Using Multi-Source Open Big Data with Ensemble Learning'. *Remote Sensing* 13 (21). <https://doi.org/10.3390/rs13214241>.
- USGS. 2018. 'Free Open Landsat Data Unleashed Power Remote Sensing Decade Ago'. 17 April 2018.
- Valdivieso-Ros, Carmen, Francisco Alonso-Sarria, and Francisco Gomariz-Castillo. 2023. 'Effect of the Synergetic Use of Sentinel-1, Sentinel-2, LiDAR and Derived Data in Land Cover Classification of a Semi-arid Mediterranean Area Using Machine Learning Algorithms'. *Remote Sensing* 15 (2): 312. <https://doi.org/10.3390/rs15020312>.
- Vassilakis, Emmanuel. 2010. 'Remote Sensing of Environmental Change in the Antirio Deltaic Fan Region, Western Greece'. *Remote Sensing* 2 (11): 2547-60. <https://doi.org/10.3390/rs2112547>.
- Villarreal, Miguel L., Sandra L. Haire, Jose M. Iniguez, Citlali Cortés Montaña, and Travis B. Poitras. 2019. 'Distant Neighbors: Recent Wildfire Patterns of the Madrean Sky Islands of Southwestern United States and Northwestern Mexico'. *Fire Ecology* 15 (1). <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0012-x>.
- Wang, De, Bojie Fu, Kangshou Lu, Luxiang Xiao, Yuxin Zhang, and Xiaoming Feng. 2010. 'Multifractal Analysis of Land Use Pattern in Space and Time: A Case Study in the Loess Plateau of China'. *Ecological Complexity* 7 (4): 487-93. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.12.004>.
- Wang, Hao, Yunfeng Hu, and Zhiming Feng. 2022. 'Fusion and Analysis of Land Use/Cover Datasets Based on Bayesian-Fuzzy Probability Prediction: A Case Study of the Indochina Peninsula'. *Remote Sensing* 14 (22): 5786. <https://doi.org/10.3390/rs14225786>.
- Wang, Qing, Shaoyun Zhong, Xueyan Li, Chao Zhan, Xin Wang, and Peng Liu. 2016. 'Supratidal Land Use Change and Its Morphodynamic Effects along the Eastern Coast of Laizhou Bay during the Recent 50 Years'. *Journal of Coastal Research* 2016-Spring (Special Issue 74): 83-94. <https://doi.org/10.2112/SI74-008.1>.
- Welch, James R., Eduardo S. Brondízio, Scott S. Hetrick, and Carlos E.A. Coimbra. 2013. 'Indigenous Burning as Conservation Practice: Neotropical Savanna Recovery amid Agribusiness Deforestation in Central Brazil'. *PLoS ONE* 8 (12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081226>.
- Wicki, Andreas, and Eberhard Parlow. 2017. 'Multiple Regression Analysis for Unmixing of Surface Temperature Data in an Urban Environment'. *Remote Sensing* 9 (7). <https://doi.org/10.3390/rs9070684>.
- Woodcock, Curtis E., Richard Allen, Martha Anderson, Alan Belward, Robert Bindschadler, Warren Cohen, Feng Gao, *et al.*, 2008. 'Free Access to Landsat Imagery'. *Science* 320 (5879): 1011-1011. <https://doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a>.
- Worrall, Fred, Ian M. Boothroyd, Rosie L. Gardner, Nicholas J.K. Howden, Tim P. Burt, Richard Smith, Lucy Mitchell, Tim Kohler, and Ruth Gregg. 2019. 'The Impact of Peatland Restoration on Local Climate: Restoration of a Cool Humid Island'. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 124 (6): 1696-1713. <https://doi.org/10.1029/2019JG005156>.
- Wu, Qi, Shiqi Miao, Haili Huang, Mao Guo, Lei Zhang, Lin Yang, and Chenghu Zhou. 2022. 'Quantitative Analysis on Coastline Changes of Yangtze River Delta Based on High Spatial Resolution Remote Sensing Images'. *Remote Sensing* 14 (2). <https://doi.org/10.3390/rs14020310>.
- Wu, Yizhou, Shuai Wang, Jiacheng Yang, Siqin Wu, Heyuan You, and Yue Wang. 2020. 'Impact of Land Use on Coastline Change of Island Cities: A Case of Zhoushan Island, China'. *Island Studies Journal* 15 (2): 335-52. <https://doi.org/10.24043/isj.125>.
- Xi, Henghui, Wanglai Cui, Li Cai, Mengyuan Chen, and Chenglei Xu. 2021. 'Evaluation and Prediction of Ecosystem Service Value in the Zhoushan Islands Based on LUCC'. *Sustainability (Switzerland)* 13 (4): 1-13. <https://doi.org/10.3390/su13042302>.

- Xie, Guanyao, and Simona Niculescu. 2021. 'Mapping and Monitoring of Land Cover/Land Use (LCLU) Changes in the Crozon Peninsula (Brittany, France) from 2007 to 2018 by Machine Learning Algorithms (Support Vector Machine, Random Forest, and Convolutional Neural Network) and by Post-Classification c'. *Remote Sensing* 13 (19). <https://doi.org/10.3390/rs13193899>.
- Xu, Caiyao, Lijie Pu, Ming Zhu, Jianguo Li, Xinjian Chen, Xiaohan Wang, and Xuefeng Xie. 2016. 'Ecological Security and Ecosystem Services in Response to Land Use Change in the Coastal Area of Jiangsu, China'. *Sustainability (Switzerland)* 8 (8). <https://doi.org/10.3390/su8080816>.
- Xu, Hanqiu, Yifan Wang, Huade Guan, Tingting Shi, and Xisheng Hu. 2019. 'Detecting Ecological Changes with a Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI) Produced Time Series and Change Vector Analysis'. *Remote Sensing* 11 (20): 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs11202345>.
- Xu, Nan. 2018. 'Detecting Coastline Change with All Available Landsat Data over 1986-2015: A Case Study for the State of Texas, USA'. *Atmosphere* 9 (3). <https://doi.org/10.3390/atmos9030107>.
- Xu, Nan, Dongzhen Jia, Lei Ding, and Yan Wu. 2018. 'Continuously Tracking the Annual Changes of the Hengsha and Changxing Islands at the Yangtze River Estuary from 1987 to 2016 Using Landsat Imagery'. *Water (Switzerland)* 10 (2). <https://doi.org/10.3390/w10020171>.
- Yasir, Muhammad, Hui Sheng, Hong Fan, Shah Nazir, Abdoul Jelil Niang, Md Salauddin, and Sulaiman Khan. 2020. 'Automatic Coastline Extraction and Changes Analysis Using Remote Sensing and GIS Technology'. *IEEE Access* 8: 180156-70. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027881>.
- Yirsaw, E., W. Wu, H. Temesgen, and B. Bekele. 2016. 'Effect of Temporal Land Use/Land Cover Changes on Ecosystem Services Value in Coastal Area of China: The Case of Su-Xi-Chang Region'. *Applied Ecology and Environmental Research* 14 (3): 409-22. https://doi.org/10.15666/aeer/1403_409422.
- Yirsaw, Eshetu, Wei Wu, Xiaoping Shi, Habtamu Temesgen, and Belew Bekele. 2017. 'Land Use/Land Cover Change Modeling and the Prediction of Subsequent Changes in Ecosystem Service Values in a Coastal Area of China, the Su-Xi-Chang Region'. *Sustainability (Switzerland)* 9 (7): 1-17. <https://doi.org/10.3390/su9071204>.
- Zareie, Sajad, Hassan Khosravi, Abouzar Nasiri, and Mostafa Dastorani. 2016. 'Using Landsat Thematic Mapper (TM) Sensor to Detect Change in Land Surface Temperature in Relation to Land Use Change in Yazd, Iran'. *Solid Earth* 7 (6): 1551-64. <https://doi.org/10.5194/se-7-1551-2016>.
- Zhang, Xiaoping, Delu Pan, Jianyu Chen, Yuanzeng Zhan, and Zhihua Mao. 2013. 'Using Long Time Series of Landsat Data to Monitor Impervious Surface Dynamics: A Case Study in the Zhoushan Islands'. *Journal of Applied Remote Sensing* 7 (1): 073515. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.7.073515>.
- Zhang, Xiaoyuan, Kai Liu, Shudong Wang, Xin Long, and Xueke Li. 2021. 'A Rapid Model (COV_PSDI) for Winter Wheat Mapping in Fallow Rotation Area Using MODIS NDVI Time-Series Satellite Observations: The Case of the Heilonggang Region'. *Remote Sensing* 13 (23): 4870. <https://doi.org/10.3390/rs13234870>.
- Zhang, Yuzhen, Jingjing Liu, Wenhao Li, and Shunlin Liang. 2023. 'A Proposed Ensemble Feature Selection Method for Estimating Forest Aboveground Biomass from Multiple Satellite Data'. *Remote Sensing* 15 (4): 1096. <https://doi.org/10.3390/rs15041096>.
- Zhao, Dongmiao, Xuefei Li, Xingtian Wang, Xiang Shen, and Weijun Gao. 2022. 'Applying Digital Twins to Research the Relationship Between Urban Expansion and Vegetation Coverage: A Case Study of Natural Preserve'. *Frontiers in Plant Science* 13 (February). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.840471>.
- Zhao, Wenzhen, Zenglin Han, Xiaolu Yan, and Jingqiu Zhong. 2019. 'Land Use Management Based on Multi-Scenario Allocation and Trade-Offs of Ecosystem Services in Wafangdian County, Liaoning Province, China'. *PeerJ* 2019 (9): 1-24. <https://doi.org/10.7717/peerj.7673>.
- Zhao, Yinghui, Ru An, Naixue Xiong, Dongyang Ou, and Congfeng Jiang. 2021. 'Spatio-temporal Land-use/Land-cover Change Dynamics in Coastal Plains in Hangzhou Bay Area, China from 2009 to 2020 Using Google Earth Engine'. *Land* 10 (11). <https://doi.org/10.3390/land10111149>.
- Zheng, Weiheng, Feng Cai, Shenliang Chen, Jun Zhu, Hongshuai Qi, Shaohua Zhao, and Jianhui Liu. 2020. 'Ecological Suitability of Island Development Based on Ecosystem Services Value, Biocapacity and Ecological Footprint: A Case Study of Pingtan Island, Fujian, China'. *Sustainability (Switzerland)* 12 (6). <https://doi.org/10.3390/su12062553>.
- Zhu, Bozhong, Yan Bai, Xianqiang He, Xiaoyan Chen, Teng Li, and Fang Gong. 2021. 'Long-Term Changes in the Land-Ocean Ecological Environment in Small Island Countries in the South Pacific: A Fiji Vision'. *Remote Sensing* 13 (18): 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs13183740>.

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DAS ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO À EROSÃO COSTEIRA

Emanoel Silva de Amorim¹, Gaby Carvalho Alves¹, Rayane Gabriella Pereira da Silva¹,
Girândia de Moraes Sampaio¹, Pedro Henrique Dantas¹, João Victor de Arruda Teles¹,
Kalinny Patrícia Vaz Lafayette¹, Jonas da Silva Bezerra¹

RESUMO: O crescimento desordenado e sem planejamento de grandes centros urbanos tende a agravar o processo de erosão costeira, tornando-se um problema que vem impactando cerca de 40% da população mundial que vive em áreas litorâneas. Neste cenário, a gestão costeira integrada surgiu com a função de tomada de decisões e ações voltadas para o desenvolvimento, uso sustentável e proteção das áreas costeiras. A gestão costeira integrada é constituída de duas medidas de proteção, sendo: medidas de prevenção e as medidas mitigadoras, que englobam as construções de estruturas rígidas na faixa litorânea com o objetivo de estabilizar a linha de costa na tentativa de minimizar os impactos de ondas de alta energia. Para definição das estruturas de contenção, deve considerar fatores como as características do solo, complexidade da execução, análise de custos, entre outros. Contudo, na literatura, existe uma escassez de pesquisas que auxiliem no processo de escolha das soluções. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa entre as principais estruturas de contenção, avaliando indicadores e aspectos ligados à viabilidade técnico-econômica. Para isso, foram avaliadas as estruturas de contenção à erosão costeira: bagwall, big bag (com coqueiros), enrocamento, espigão, engorda de praia e betonbloc. Foram compilados 05 (cinco) indicadores ligados à viabilidade técnica e econômica das estruturas de contenção à erosão costeira, sendo eles: processo construtivo, eficiência do uso, impactos socioambientais, durabilidade e custo. Como resultados obtidos foi o diagnosticado que o big bag possui o preço por metro linear mais baixo que os demais (2.400,00 m/R\$), contudo, quanto a durabilidade, enrocamento, espigão e betonbloc possuem baixo custo de manutenção, longo prazo para realização de manutenção preventiva e longa vida útil. Por fim, a presente pesquisa apresenta as particularidades de cada solução existente, constituindo um material facilitador do processo decisório de gestores e projetistas.

Palavras Chaves: Erosão costeira; Estrutura costeira; Contenção marítima; Viabilidade técnico-econômica; Indicadores de viabilidade.

ABSTRACT: The disorderly and unplanned growth of large urban centers tends to aggravate the process of coastal erosion, becoming a problem that has been impacting about 40% of the world's population that lives in coastal areas. In this scenario, integrated coastal management emerged with the role of decision-making and actions aimed at the development, sustainable use and protection of coastal areas. Integrated coastal management consists of two protection measures, namely: prevention measures and mitigation measures, which include the construction of rigid structures on the coastal strip with the objective of stabilizing the coastline in an attempt to minimize the impacts of waves of high energy. To define the containment structures, factors such as soil characteristics, execution complexity, cost analysis, among others, must be considered. However, in the literature, there is a lack of research that helps in the process of choosing solutions. In this way, the present work aims to carry out a comparative analysis between the main containment structures, evaluating indicators and aspects related to the technical-economic viability. For this, coastal erosion containment structures were evaluated: bagwall, big bag (with coconut trees), riprap, spike, beach fattening and betonbloc. 05 (five) indicators were compiled related to the technical and economic viability of coastal erosion containment structures, namely: construction process, efficiency of use, socio-environmental impacts, durability and cost. As results obtained, it was diagnosed that the big bag has the price per linear meter lower than the others (2,400.00 m/R\$), however, in terms of durability, rockfill, spike and betonbloc have low maintenance cost, long term for carrying out preventive maintenance and long service life. Finally, this research presents the particularities of each existing solution, constituting a material that facilitates the decision-making process of managers and designers.

Keywords: Coastal erosion; Coastal structure; Maritime containment; Technical-economic viability; Feasibility indicators.

@ Corresponding author: esa7@poli.br

¹ Universidade de Pernambuco - UPE

1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são ambientes sensíveis (Silva *et al.*, 2019), consideradas espaços valiosos por possuírem grande potencial socioeconômico e conterem inúmeros atrativos, que atendem aos mais diversos propósitos, como turismo, recreação e moradia (Menezes; Pereira; Gonçalves, 2018; Possebon *et al.*, 2023). Dessa maneira, do ponto de vista estratégico, possuem grande importância aos fins econômicos, ambientais, sociais e culturais da população (SILVA *et al.*, 2019; Amorim; Sampaio; Silva, 2023).

Contudo, as áreas costeiras possuem uma dinâmica bastante peculiar, que é capaz de alterar todos os ambientes praias. A ação de forças naturais, como: eventos climáticos, marés astronômicas e correntes costeiras, modelam os perfis praias, sendo perceptíveis em séries históricas, onde se observam mudanças do balanço sedimentar e retrogradação da linha de costa (Bosom; Jimenez, 2010; Menezes; Pereira; Gonçalves, 2018).

Em áreas de maior adensamento populacional, a erosão costeira se torna uma grande preocupação, pois esses ambientes, por natureza, já são considerados frágeis, e a crescente ocupação desses espaços pelo homem tem acentuado os processos de degradação (Vasconcelos, 2010; Amorim; Sampaio; Silva, 2022; Sampaielias *et al.*, 2022). Isso vem sendo confirmado pelo monitoramento realizado entre os anos 2013 e 2018, pelo Ministério do Meio Ambiente Brasileiro, que constatou o aumento do processo erosivo nas zonas costeiras de 40% para 60% (PGGM, 2021).

As principais consequências da erosão costeira são os danos nas estruturas de defesa, além da perda do território habitável por propriedades comerciais e/ou habitacionais, e espaços recreativos. Essas consequências vêm gerando impactos severos na vida dos moradores do litoral brasileiro. Neste cenário, surgiu a gestão costeira integrada, que é um processo contínuo e dinâmico através de decisões e ações voltadas para o desenvolvimento, uso sustentável e proteção das áreas costeiras (Souza; Moura; Souza, 2023; Asmus *et al.*, 2006). A gestão costeira integrada é constituída de duas medidas de proteção, sendo prevenção, voltadas para evitar os impactos da erosão costeira, estabelecendo uma faixa de proteção destinada a absorver o recuo da linha da costa, adaptando os moradores para conviver com as especificidades do meio em que vivem. Já as medidas mitigadoras, englobam as construções de estruturas rígidas na área praias com o objetivo de estabilizar a linha de

costa na tentativa de minimizar os impactos de ondas de alta energia (Confessor; Silva; Araújo, 2022).

Para definir o tipo de estrutura de contenção é preciso levar em consideração fatores como: características do solo, cargas atuantes, complexidade da execução, análise de custos, entre outros. O fato é que nenhuma medida de proteção costeira consegue interromper permanentemente a erosão (Brayshaw; Lemckert, 2012), sendo possível apenas minimizar seus efeitos através da execução de obras de defesa do litoral (Bulhões, 2020). Vale salientar que é primordial identificar os fatores para escolher o melhor método de controle da erosão costeira: durabilidade da obra, disponibilidade de materiais para construção, tipos de transporte, custos e benefícios, impactos socioambientais, mão de obra qualificada e tipo de manutenção a longo prazo (Souza, 2008).

Os significativos prejuízos econômicos e os impactos no meio ambiente sofridos ao longo do tempo vêm estimulando a formulação de diferentes metodologias para a identificação da suscetibilidade à erosão costeira (Furtado; Woodroffe, 2021), através deste diagnóstico, é possível propor soluções eficientes e adequadas ao local da intervenção. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa entre as principais estruturas de contenção à erosão costeira, avaliando indicadores e aspectos ligados à viabilidade técnico-econômica, contribuindo tecnicamente no processo de escolha de soluções para intervir nas zonas costeiras.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Classificação da pesquisa

A pesquisa é de natureza estratégica pois visou complementar e sistematizar informações relativa aos aspectos e indicadores de qualidade das principais estruturas de contenção à erosão costeira, utilizando uma abordagem qualitativa onde foi possível avaliar as características de cada solução existente, produzindo um conhecimento útil que poderá ser, eventualmente, utilizado em estudos práticos e teóricos.

2.2 Etapas metodológicas

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, do tipo revisão narrativa teórica, com o objetivo de levantar as principais características das seguintes estruturas de contenção à erosão costeira: Bagwall, Big Bag (com coqueiros), Enrocamento, Espigão, Engorda de Praia e Betonbloc.

A revisão narrativa teórica é a análise da literatura somada à crítica pessoal do autor. O processo de coleta de dados utilizou como base o *google scholar* e portal de periódico CAPES, através dos seguintes termos de busca: “Erosão costeira”; “Estrutura costeira”; “Contenção marítima”; “Bagwall”; “Big Bag”; “Enrocamento”; “Espigão”; “Engorda de Praia”; “Betonbloc”. Foram aceitos para análise toda literatura publicada em livros, capítulos de livros, artigos de revista impressas e/ou eletrônicas, trabalhos de graduação, dissertação ou tese, publicados em língua portuguesa ou inglesa, e em um período de 1980 a 2013. Como resultado, foi apresentado o relatório final da revisão narrativa teórica.

A segunda etapa consistiu na elaboração do estudo de viabilidade técnica-econômica por meio da análise e comparação dos dados obtidos através da revisão narrativa teórica, utilizando como instrumento a planilha apresentada na Figura 1.

A Figura 1 apresenta os 05 (cinco) indicadores ligados à viabilidade técnica e econômica das estruturas de contenção à erosão costeira, os quais foram analisados pela ótica de determinados aspectos:

I. Processo Construtivo

As estruturas de contenção à erosão costeira possuem processos construtivos peculiares, isso porque a intervenção acontece em um ambiente natural e dinâmico. A execução destas estruturas deve respeitar e se integrar às tábuas de marés (maré alta e baixa), a dinâmica do uso por moradores, turistas e trabalhadores, garantindo menor impacto e interferência na área de influência onde está localizada a obra.

- a) Localização do canteiro de obra, o qual foi analisado como: Perto / Médio / Longo.

INDICADORES DA VIABILIDADE	ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO À EROSION COSTEIRA					
	Bagwall	Big Bag	Enrocamento	Espigão	Engorda de Praia	Betonbloc
I. Processo Construtivo						
Localização do canteiro de obra						
Armazenamento de materiais e insumos						
Prazo de execução						
Equipe técnica e equipamentos necessários						
II. Eficiência do uso						
Dissipador de energia						
Muro de arrimo						
III. Impactos socioambientais						
Grau de interferência na fauna e flora do local						
Adaptação com a Acessibilidade						
Grau de Reversibilidade						
Propagação de vetores (ratos, baratas e mosquitos)						
Utilização da areia da praia ou utilização dos materiais in loco						
IV. Durabilidade						
Custo e prazo de manutenção						
Vida útil						
V. Custo						
Valor da obra por metro linear (M/R\$)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
LEGENDA						
Baixo / Curto / Muito / Longe / Sem qualificação específica						
Médio						
Alto / Longo / Pouco / Perto / Mão de Obra Qualificada						
Atende	A					
Não Atende	N/A					

Figura 1: Análise da viabilidade técnica-econômica. Fonte: Autores (2023).

- b) Local de armazenamento de materiais e insumos, o qual foi analisado como: Perto / Médio / Longo.
- c) Prazo de execução, o qual foi analisado como: Pouco / Médio / Muito.
- d) Equipe técnica e equipamentos necessários, o qual foi analisado como: Sem qualificação específica / Mão de Obra Qualificada.

II. Eficiência do uso

Quando a linha de costa apresenta uma plataforma urbanizada, para garantir a plena eficiência, as estruturas de contenção à erosão costeira devem possuir dupla função, atendendo os seguintes aspectos:

- a) A montante: Contenção marítima, inclusive com capacidade de dissipar a energia das ondas e combater o vórtex das ondas (para não acelerar o processo erosivo), o qual foi analisado como: Alta / Média / Baixa.
- b) A jusante: Muro de arrimo, para suportar os também esforços que o terreno fará sobre a estrutura, o qual foi analisado como: Alta / Média / Baixa.

III. Impactos socioambientais

A escolha das estruturas de contenção à erosão costeira deve considerar e avaliar os impactos socioambientais que a intervenção poderá causar no ambiente, portanto é importante verificar fatores, como:

- a) Grau de interferência na fauna e flora do local, o qual foi analisado como: Pouco / Médio / Muito.
- b) Adaptação com a Acessibilidade (padrão NBR 9050/2020), o qual foi analisado como: Atende ou Não Atende.
- c) Grau de Reversibilidade, o qual foi analisado como: Alta / Média / Baixa.
- d) Propagação de vetores (*ratos*, *baratas* e *mosquitos*), o qual foi analisado como: Pouco / Médio / Muito.
- e) Utilização da areia da praia ou utilização dos materiais in loco, o qual foi analisado como: Alta / Média / Baixa.

IV. Durabilidade

Um dos indicadores mais preponderantes na viabilidade técnica e econômica na escolha das estruturas de contenção à erosão costeira é a durabilidade, sendo observado os seguintes parâmetros:

- a) Custo de manutenção, o qual foi analisado como: Pouco / Médio / Muito.
- b) Prazo de manutenção, o qual foi analisado como: Curto / Médio / Longo.
- c) Vida útil, o qual foi analisado como: Curto / Médio / Longo.

V. Custo

Além da durabilidade, o custo tem sido o principal indicador na escolha das estruturas de contenção à erosão costeira. Preferencialmente, os dados foram extraídos através de pesquisa documental em processos licitatórios atuais e/ou antigos com valores ajustados para a mesma data/base. Sendo analisado o custo unitário do metro linear da obra (m/R\$).

As correções financeiras utilizaram o INCC - Índice Nacional de Custo da Construção e seguiram a Equação 1 apresenta a determinação do valor reajustado.

$$R = li - lo / lo \times V$$

Sendo:

R= Valor reajustado (R\$)

lo= Índice de preço verificado no mês de abertura do processo licitatório ou da proposta da obra privada

li= Índice de preço referente ao mês de janeiro/2023

V= Valor da obra (R\$)

3. RELATÓRIO FINAL DA REVISÃO NARRATIVA TEÓRICA

3.1 Bag Wall

O Bag Wall é um dissipador de energia (Figura 2), uma estrutura rígida de proteção que utiliza um sistema de contenção têxtil (geoformas) a fim de prender e moldar o concreto, argamassa ou areia, com auxílio de formas de madeiras ou sacos têxteis.

Normalmente, são pequenos reservatórios de volume baixo preenchidos no ambiente destinado à obra de retenção do processo erosivo. Este método visa reter o avanço marítimo, estabilizando a linha costeira, dissipando a energia gerada pelas ondas no ambiente de ocorrência do processo erosivo sem deslocá-la para áreas circunvizinhas, viabilizando a engorda natural da praia (equilíbrio sedimentar) e possibilitando acessibilidade à praia pela sociedade (Saathoff; Witte, 1995; Lawson, 2008).



Figura 2: Bag Wall em Paulista/PE. Fonte: Autores (2023).

O uso de geoformas têxteis é essencial para assegurar celeridade nos serviços e a resistência do concreto dentro da água no decorrer da realização da obra. A longevidade da obra assim como a frequência de manutenção varia de acordo com o substrato de preenchimento dos sacos. Dessa forma, pode chegar, em média, até 10 anos, quando preenchido em areia, necessitando de uma frequência maior de manutenção que os sacos preenchidos de concreto ou argamassa, com vida útil de até 50 anos. Em contrapartida, os sacos preenchidos em areia possuem baixo impacto ambiental e alto grau de reversibilidade. Apresenta como desvantagem a dificuldade ou impossibilidade de aplicação da técnica em locais distantes do raio urbano, enquanto as vantagens, conforme Souza (2008), são:

- a) Adaptação às normas de acessibilidade: mesmo assegurando a integração de banhistas ao mar e à praia de forma prazerosa, não é comum a utilização de rampas de acesso.
- b) Material de fácil obtenção – a aquisição de geoformas é fácil, uma vez que seu enchimento é realizado com microconcreto.
- c) Mão de obra – faz uso da mão de obra local e sem qualificação específica.
- d) Estética Favorecida – o *Bag Wall* é compatível com o espaço urbano, gerando um efeito visual harmônico.
- e) Flexibilidade – Quando em areia, possui alto grau de reversibilidade, caso contrário, quando em concreto ou argamassa, uma vez que os blocos de concreto são aplicados justapostos e têm peso de 2 toneladas (quando estão fora da água), havendo necessidade de destino final dos resíduos. Contudo, caso haja uma demanda de aumento na altura do *Bag Wall* no futuro, pode ser ampliado com facilidade.

- f) Recuperação do perfil da praia – desempenha o papel de recuperar a zona erodida, favorecendo e viabilizando a engorda natural da área de intervenção.

Essa técnica auxilia na redução da erosão local ao evitar a perda de sedimentos, contribuindo com a manutenção do equilíbrio da sedimentação na área. Sendo assim, é uma ação importante para a proteção da zona costeira, tornando-se uma ferramenta eficaz em resposta à problemática da erosão costeira (BRASIL, 2018). Uma vez que atua como um muro de arrimo, dissipando a energia das ondas, evitando a formação de trens de ondas, assim, resultando no retorno da onda e minimizando o impacto e a força das ondas seguintes (SILA; MORAES; STRUMINSKI, 2018).

3.2 Big Bag (com coqueiros)

A estrutura visa a prevenção da linha de costa, dissipando a energia da onda, consiste na instalação de coqueiros na parte da frente e sacos de areia na parte de trás (Figura 3). A grande vantagem da obra de Big Bag com coqueiros é a viabilidade financeira, apresentando baixo custo com mão de obra e material. (Teixeira; Almeida; Lavenère-Wanderley, 2011; Vasconcelos, 2010; Takagi *et al.*, 2020).



Figura 3: Big Bag (com coqueiros) em Paulista/PE. Fonte: Autores (2023).

Em compensação, é muito importante analisar a vida útil deste tipo de material, visto que, a depender do grau de erosão da praia, será necessária a avaliação para saber se a utilização dessa metodologia é satisfatória ou não (Fischer; Calliari, 2006).

3.3 Enrocamento

O enrocamento, conhecido também como rip-rap, guias-correntes ou molhes (Figura 4), é um método que visa proteger taludes e canais contra os impactos erosivos ou solapamentos provocados pelos deslocamentos da água, amortecendo-os (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2007; Alleanza, 2016).



Figura 4: Estrutura de Enrocamento com pedras - Paulista/PE. Fonte: Autores (2023).

É, geralmente, composto por uma infraestrutura de pedras ou blocos artificiais, podendo ser de: pedra arrumada ou lançada, na qual a pedra deve ser sólida e rígida, oriunda de rocha sã/inalterada, apresentado o diâmetro e a granulometria conforme a definição do projeto; e rejuntada ou sem argamassa, visando a constituição de um robusto bloco de pedras, onde o rejuntamento ocorre de acordo com o estabelecido por projeto, caso não exista uma indicação de uso, deve ser realizado com concreto com agregado máximo, composto por brita 1 ou por argamassa de cimento e areia (no traço mínimo de 1:3), em concordância com o formato das pedras (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2007; Alleanza, 2016).

Quando utilizado este método as pedras precisam ser manuseadas manualmente, intercalando os seus diâmetros, de forma que seja adquirido o suporte das pedras de maior porte pelas de menor porte, garantindo estabilidade e poucas ou nenhuma brechas. Além disso, é necessário que a disposição

das pedras seja realizada de maneira que as faces visíveis do enrocamento permaneçam uniformes, sem concavidades, fossas ou proeminências maiores que a metade da maior dimensão das pedras aplicadas. Já nas estruturas de pedra rejuntada, ao passo que as superfícies visíveis do enrocamento sejam concluídas, suas juntas precisam ser limpas, molhadas até saturar e completadas com argamassa de traço 1:3 até 5 cm de profundidade. Juntas com 10 cm, não necessitam de preenchimento com argamassa para que atuem como canal de escoamento de água (barbacãs) (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2007).

Esta técnica possibilita a formação de estruturas costeiras de proteção, de corte diagonal trapezoidal, estabelecendo, deste modo, uma barreira à difusão frequente do fluxo das ondas, viabilizando a fragmentação e ruptura da sua energia, i.e., ocorre uma percolação no interior da onda com o rompimento da agitação no enrocamento. Além disso, tal método é estruturado com revestimentos resistentes, mensurados e estabelecidos para suportar os impactos provenientes das ondas, através de filtros de enrocamento e de um núcleo, com proporções e medidas diferentes. É fundamental realizar o levantamento de informações relevantes do local destinado, como estudos geológicos, geotécnicos hidráulicos, entre outros (Alleanza, 2016).

A finalidade principal do enrocamento é proporcionar a estabilização da linha costeira e minimizar as ações erosivas a partir da quebra da energia das ondas, visto que esta é uma técnica de intervenção permeável. O enrocamento é caracterizado por apresentar uma integridade operacional dependente da sustentação da base da porção de proteção que o envolve, ou seja, ele não é auto suportável, precisando, desta forma, do solo para ter estabilidade (Gois, 2018).

A estrutura do enrocamento pode ser desenvolvida em praia ou em encosta de falésia, apenas se houver estabilidade. É colocada com suas faces inclinadas, orientadas no sentido do mar, constituídas principalmente por elementos porosos, como blocos rochosos ou pré-moldados, fazendo-se de baixa refletividade quanto às ondas, reduzindo a incidência de ondas sobre a face da praia. A composição do enrocamento é constituída, basicamente, por três elementos (Gois, 2011; Press *et al.*, 2006):

- a) Camada de proteção ou armadura – é responsável por estabelecer as características dos demais componentes. Para ser eficaz, precisa ser consistente e perene quanto à ação das ondas e ser executada em arranjos de

rochas em granodecrescência ascendente (gradação do tamanho dos sedimentos que se tornam mais finos da base para o topo das camadas).

- b) Camada filtrante – é composta por um underlying filter (filtro inferior), possibilitando sustentação à armadura, para que a água subterrânea seja drenada na estrutura, impedindo, assim, que o solo seja arrastado ou transportado por impactos do fluxo da água na armadura ou por infiltrações.
- c) Proteção de pé – promove a estabilidade da estrutura e a protege contra assentamentos, recalques, deslocamentos ou remoção das bordas da estrutura com face para o mar.

Apresenta como vantagens o baixo custo de manutenção e a eficácia na quebra de energia das ondas. E tem desvantagens de precisar de mão de obra especializada, a possibilidade de ocasionar reflexão de ondas (oblíquas/de borda), seus materiais de construção são dependentes de jazidas (relação distância x valor x disponibilidade), além da possibilidade de perda quanto ao valor paisagístico, turístico e recreacional do litoral (PRATA, 2018).

3.4 Espigões

Os espigões estão entre as obras de proteção mais utilizadas para o controle de erosão costeira. São construções transversais fixadas na costa e se estendem até a faixa da praia, atuando diretamente sobre o transporte de sedimentos litorâneos na zona em que ele é mais expressivo, podem agir isoladamente ou em conjunto (Alfredini; Arasaki, 2009; Lyra, 2012).

Conforme Fischer e Calliari (2006), os espigões podem ser feitos de concreto, aço, madeira, pedras e sacos preenchidos com areia, com o objetivo de:

- a) Resistir às forças produzidas por ondas e correntes;
- b) Reduzir impactos de entulhos flutuantes;
- c) Diminuir pressões criadas pela diferença de altura da areia entre os lados da estrutura;
- d) Desviar o fluxo de eventuais zonas críticas, prevendo erosões; e
- e) Favorecer a sedimentação do material de arraste entre os mesmos e, neste caso, no interior, usualmente, são definidos como espigões retardadores de fluxo.



Figura 5: Espigões na orla de Fortaleza (CE). Fonte: PELLIZZON (2019).

As funções desse tipo de estrutura são estabilizar praias sujeitas a modificações, alargar a extensão da faixa litorânea (Figura 5) e evitar assoreamento no sotamar. Intervindo parcialmente ou totalmente no transporte de sedimentos litorâneos, fazendo com que ocorra deposição a barlamar (Alfredini; Arasaki, 2009).

Os espigões oferecem utilidade limitada em alguns estuários, onde a taxa de transporte ao longo da costa e o suprimento de areia são baixos. Eles também possuem restrição em locais onde o material litorâneo é formado por argilas e siltes, pois tendem a se mover, não sendo retidos pela estrutura. Outra desvantagem é que eles poderão prejudicar praias próximas, pois retêm a areia que iria suprir a faixa litorânea (Nordestron, 1992; Hegger, 1996; Bush, 2001).

O custo com esse tipo de estrutura pode variar de acordo com o material empregado. Em Chesapeake, nos Estados Unidos, foram construídos espigões de madeira "wood groins", em conjunto com a técnica de engordamento, para resolver problemas de erosão (Fischer; Calliari, 2006).

3.5 Engorda de Praia

Consiste em uma solução temporária, para os casos em que não se conhece suficientemente as causas da erosão (Figura 6). Este tipo de intervenção é muito utilizado quando não possuem proteção natural adequada (Netto; Bulhões, 2017). Tal processo busca estabilizar ou ampliar praias já existentes e que estão sujeitas à erosão, ou criar uma praia de proteção que absorva a energia das ondas (Patriota, 2021).

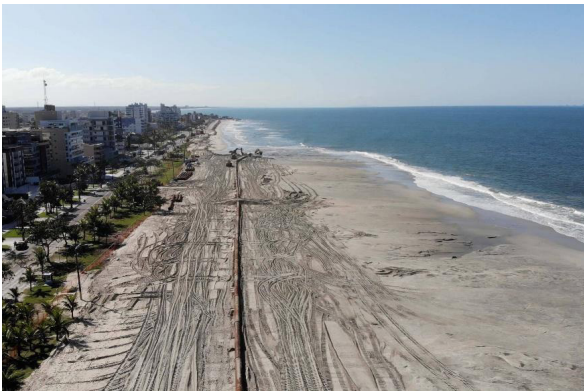


Figura 6: Espigão na praia de Matinhos (PR). Fonte: DIAS (2022)

Esta técnica é considerada eficaz, ambientalmente sustentável e relativamente positiva em relação a processos erosivos em curto prazo, e a erosões de médio e longo prazo (HAMM, 2002). Tem como objetivo restaurar e revitalizar as áreas utilizadas por banhistas, proteger construções civis através da diminuição da

erosão e criar novas praias (Fischer; Calliari, 2006).

Essa intervenção é uma alternativa estrutural reconhecida como uma das melhores defesas contra a erosão costeira, uma vez que não necessita de obras fixas, que destoam do ambiente natural e que podem trazer efeitos colaterais para as áreas vizinhas. São utilizadas principalmente as peças maciças de concreto nos muros de choque. Porém, podem ser construídos com estacas pranchas de concreto, estacas metálicas ou de madeira (Ceccarelli, 2009).

A vida útil desta estrutura vai depender do grau e velocidade de erodibilidade da praia. Eventos climáticos, como tempestades, poderão eliminar rapidamente o preenchimento em um pequeno espaço de tempo. É importante realizar uma análise de custo do projeto comparando-o com a praia em que será empregado o engordamento, se o valor é viável ou não, pois este tipo de obra requer manutenção periódica, sendo mais vantajoso em praias com baixo índice de erosão (Dean, 1995; Fischer; Calliari, 2006).

Uma simulação de custo de obras costeiras realizadas por Dean e Dalrymple (2004), apontaram valores 45,00/m³ considerando uma área de alimentação entre (226,8m³/m e/ou 264,6m³/m) custaria em 1km de projeto o montante de R\$ 10.206.000,00/km e/ou R\$ 11.907.000,00/km dependendo do tipo de sedimento adicionado.

3.6 Betonbloc

O sistema Betonbloc é uma tecnologia de contenção marítima de origem holandesa, que consiste na construção de um muro composto por blocos de concreto, sem utilização de armadura, que se encaixam perfeitamente formando uma estrutura semirrígida, conforme a Figura 7, sendo suficiente para conter a energia do mar através da dissipação da energia no próprio corpo da contenção. Esse sistema Betonbloc vem sendo utilizado no Brasil como muro de contenção costeira desde o ano de 2015.

Esse sistema apresenta função dupla, como é demonstrado na Figura 08, pois a montante atua como contenção marítima, dissipando a energia de impacto das ondas e, a jusante, age como arrimo, suportando o peso que o terreno cria sobre o muro de contenção.

De acordo com Amorim *et al.* (2023), no sistema BetonBloc, existem características favoráveis em relação às demais tipologias de defesa costeira, pois apresenta:

- a) Menor prazo de execução – A utilização de peças pré-moldadas e em módulos confere velocidade à obra.

Quando comparadas com outras tecnologias, a redução de tempo é da ordem de 4:1;

- b) Contenção escalonada - Possui uma geometria de montante, em forma de escada, para dissipar a energia do mar, reduzir a força do retorno das ondas e diminuir o spray da água após o contato com o muro.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Conforme Figura 9, para realização do estudo do custo unitário, foram obtidos preços em pesquisa de processos licitatórios, sendo que, para o Bagwall, foi consultada a concorrência nº 001/2013, realizada em 14/11/2013 pela Prefeitura Municipal do Paulista/PE, para o Enrocamento, foi consultada a Tomada de Preços nº 032/2021, realizada em 21/12/2021

pela Prefeitura Municipal Angra dos Reis/RJ, para a Engorda de praia, foi consultada a concorrência nº 002/2021, realizada em 17/08/2021 pela Governo do Estado do Paraná. Os índices de reajustes foram obtidos pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), onde todas as datas bases foram atualizadas para o índice do INCC de fevereiro/2023.

As demais obras não necessitam de reajuste, uma vez que os preços têm data base no mês de referência. Dessa forma, para o Espigão, foi consultada a Tomada de Preços nº 002/2023, realizada em 03/01/2023 pela Prefeitura Municipal Balneário Piçarras/SC. Além disso, foram obtidos preços através de consulta a obras privadas, como o Big bag, onde foi consultada a obra realizada em fevereiro/2023 no estado de Pernambuco e o Betonbloc, onde foi consultada a obra realizada em fevereiro/2023 no estado de Pernambuco.



Figura 07: Aplicação do Sistema BetonBloc: antes (a); depois (b) - Natal/RN. Fonte: Autores (2023).

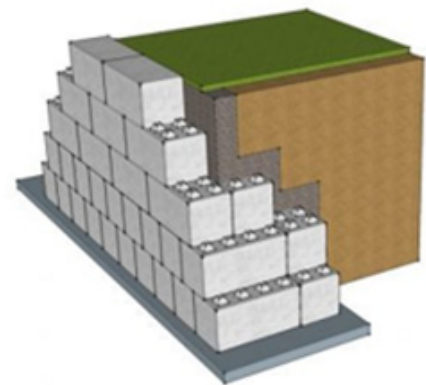
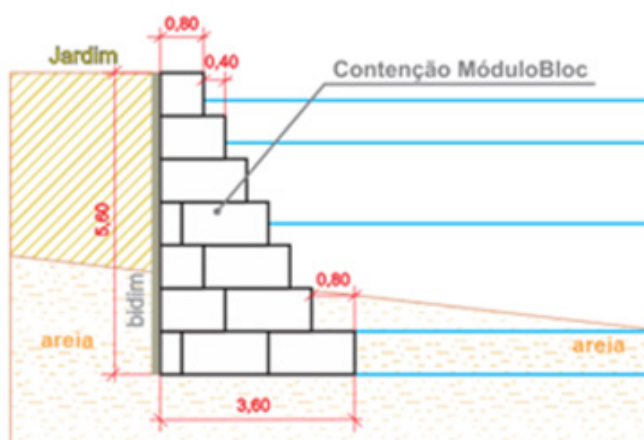


Figura 08: Sistema BetonBloc a) perfil transversal b) perspectiva. Fonte: autores (2023).

Ao analisar as estruturas de contenção apenas pela ótica dos custos, percebe-se que o Big Bag possui o preço por metro linear mais baixo. Contudo, no processo de escolha da solução, as boas práticas de gestão costeira integrada apontam que se faz necessário avaliar a viabilidade técnica de todas as estruturas de contenção. Por isso, com as informações acima acrescidas das informações obtidas pela revisão literária realizada no item

3.0, foi possível avaliar a viabilidade técnica-econômica das estruturas de contenção e consolidar os dados na Figura 10.

Quanto ao indicador processo construtivo, foi diagnosticado que a logística da obra é facilitada quando o canteiro de obras e do setor de armazenamento de materiais e insumos estão localizados próximos ao local de intervenção. Por esse

ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO À EROSÃO COSTEIRA	OBRAS DE REFERÊNCIA					CORREÇÃO VALOR PELO INCC			Custo unitário da obra (m/R\$)
	Instituição	Data base	Modalidade	Extensão (m)	Valor de referência (V)	li	lo	Valor reajustado (R)	
Bagwall	Prefeitura Municipal do Paulista/PE	14/11/2013	Concorrência nº 001/2013	500,00	R\$ 1.985.480,27	564,201	1051,632	R\$ 3.700.799,16	R\$ 7.401,60
Big Bag	Obra Privada	02/02/2023	Pernambuco	150,00	R\$ 360.000,00	---	---	R\$ 360.000,00	R\$ 2.400,00
Enrocamento	Prefeitura Municipal Angra dos Reis/RJ	21/12/2021	Tomada de Preços nº 032/2021	210,00	R\$ 1.249.948,20	962,321	1051,632	R\$ 1.365.953,28	R\$ 6.504,54
Espigão	Prefeitura Municipal Balneário Piçarras/SC	03/01/2023	Tomada de Preços nº 002/2023	70,00	R\$ 1.318.534,07	---	---	R\$ 1.318.534,07	R\$ 18.836,20
Engorda de Praia	Governo do Estado do Paraná	17/08/2021	Concorrência nº 002/2021	6300,00	R\$ 381.706.861,13	939,699	1051,632	R\$ 427.174.180,01	R\$ 67.805,43
Betonbloc	Obra Privada	02/02/2023	Pernambuco	121,60	R\$ 1.402.226,57	---	---	R\$ 1.402.226,57	R\$ 11.531,47

Figura 09: Custo unitário por metro linear de estruturas de contenção (m/R\$). Fonte: autores (2023).

INDICADORES DA VIABILIDADE	ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO À EROSÃO COSTEIRA					
	Bagwall	Big Bag	Enrocamento	Espigão	Engorda de Praia	Betonbloc
I. Processo Construtivo						
Localização do canteiro de obra	Per to	Per to	Mé dio	Lo ngo	Per to	Per to
Armazenamento de materiais e insumos	Per to	Per to	Mé dio	Lo ngo	Mé dio	Per to
Prazo de execução	Mé dio	Pou co	Mui to	Mui to	Mé dio	Pou co
Equipe técnica e equipamentos necessários	SQE	SQE	SQE	MOQ	SQE	MOQ
II. Eficiência do uso						
Dissipador de energia	Mé dio	Bai xo	Mé dio	Al to	Mé dio	Al to
Muro de arrimo	Bai xo	Bai xo	Mé dio	Bai xo	Bai xo	Al to
III. Impactos socioambientais						
Grau de interferência na fauna e flora do local	Pou co	Pou co	Mé dio	Mé dio	Pou co	Mui to
Adaptação com a Acessibilidade	N/A	N/A	N/A	N/A	A	A
Grau de Reversibilidade	Mé dio	Al to	Mé dio	Mé dio	Mé dio	Bai xo
Propagação de vetores (ratos, baratas e mosquitos)	Mé dio	Mui to	Mui to	Mui to	Pou co	Pou co
Utilização da areia da praia ou utilização dos materiais in loco	Mé dio	Al to	Bai xo	Bai xo	Bai xo	Bai xo
IV. Durabilidade						
Custo de manutenção	Mé dio	Mui to	Pou co	Pou co	Mé dio	Pou co
Prazo de manutenção	Mé dio	Cur to	Lo ngo	Lo ngo	Mé dio	Lo ngo
Vida útil	Mé dio	Cur to	Lo nga	Lo nga	Mé dio	Lo nga
V. Custo						
Valor da obra por metro linear (M/R\$)	R\$ 7.401,60	R\$ 2.400,00	R\$ 6.504,54	R\$ 18.836,20	R\$ 67.805,43	R\$ 11.531,47
LEGENDA						
Baixo / Cur to / Mui to / Lo ngo / Sem qualificação específica	[Red Box]					
Mé dio	[Yellow Box]					
Al to / Lo ngo / Pou co / Per to / Mão de Obra Qualificada	[Green Box]					
Atende	[White Box]					
Não Atende	[Grey Box]					

Figura 10: Quadro comparativo da viabilidade técnica-econômica das estruturas de contenção. Fonte: autores (2023).

parâmetro, as estruturas mais viáveis são os Bagwall, Big Bag, Engorda de praia e Betonbloc. Também foi diagnosticado que o prazo de execução é menor nas obras em Big Bag e Betonbloc. Porém, referente à equipe e equipamentos obras, Betonbloc e Espigão necessitam de mão de obra qualificada e equipamentos especializados.

Quanto ao indicador eficiência do uso, foi diagnosticado que o Betonbloc é mais viável, tornando-se o único capaz de ter a função de dissipar a energia das obras e estabilizar a plataforma urbanizada pela ação de muro de arrimo.

Quanto ao indicador impacto socioambientais, conclui-se que o grau de interferência na fauna e flora é menor nas obras em Bagwall, Big bag e Engorda de praia. Já a adaptabilidade às normas de acessibilidade é apenas encontrada em obras de Betonbloc e Engorda de praia. Em casos de necessidade de substituir o tipo de estrutura, o diagnóstico realizado conclui que o Big bag é o único com alto grau de reversibilidade, tornando-se o mais viável quanto a este parâmetro. O Betonbloc e a Engorda de praia são as únicas estruturas de contenção que não facilitam a propagação de vetores, como ratos, baratas, escorpiões e outros.

Quanto ao indicador de durabilidade, conclui-se que o Enrocamento, Espigão e Betonbloc possuem baixo custo de manutenção, longo prazo para realização de manutenção preventiva e longa vida útil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É identificável que todo litoral se encontra suscetível à ocorrência de erosões costeiras. Logo, faz-se necessário o manejo desta problemática, realizado a partir de intervenções viáveis, antes que atinja proporções alarmantes. Principalmente em áreas urbanas, pelo nível de ocupação e interferência com o espaço natural, é importante que haja a implementação de ações ligadas aos impactos ambientais e à gestão costeira que possam estabilizar e proteger o ambiente praias.

Todas as técnicas analisadas visam a redução da erosão local e proteção da zona costeira. Contudo, é necessário entender as particularidades do ambiente para poder escolher o melhor método a ser aplicado. Sendo essencial ao processo de escolha a observação e diagnóstico dos indicadores: durabilidade da obra, disponibilidade de materiais para construção, tipos de transporte, custos e benefícios, impactos socioambientais, mão de obra qualificada e tipo de manutenção a longo prazo.

Pela análise realizada, de modo geral, percebe-se que: é viável a utilização de Big Bag e Betonbloc quanto à gestão, localização e armazenamento de materiais próximos ao local e menor prazo de execução. O Big Bag é o mais viável quanto aos impactos socioambientais e é o único com alto grau de reversibilidade. Enquanto o mais eficiente, adaptável às normas de acessibilidade, dificulta a propagação de vetores, longa vida útil, menor custo de manutenção e longo prazo de manutenção preventiva é o Betonbloc. Apesar disso, apresenta as desvantagens de precisar de mão de obra qualificada e equipamentos especializados.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto*. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2014.
- Ahmad, Hafez. Coastal Zone Management Bangladesh Coastal Zone Management Status and Future Trends. *J Coast Zone Manag*, [S. l.], v. 22, n. 466, p. 1-6, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.4172/2473-3350.1000466>
- Alleanza. Sistema de Proteção Costeira da Orla de Itapema: Fixação das Barras do Rio Perequê, Rio Bela Cruz e Rio Taboleiro das Oliveiras. *Relatório Técnico - Projeto Básico*, Santa Catarina, 2016.
- Alfredini, P. & Arasaki, E. *Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental*. 2. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2009.
- Amorim, E. S.; Sampaio, G. M.; Silva, H. L. F. Avaliação dos níveis de acessibilidade em vias públicas. *Ambiente: Gestão e Desenvolvimento*, v. 15, n. 2, p. 54-60, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24979/ambiente.v15i2.1126>
- Amorim, E. S.; Sampaio, G. M.; Silva, H. L. F. Diretrizes para elaboração de planos de acessibilidade em vias urbanas. *Ambiente: Gestão e Desenvolvimento*, v. 15, n. 3, p. 41-48, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24979/ambiente.v15i3.1141>
- Amorim, E. S. de; Sampaio, G. de M.; Lafayette, K. P. V.; Silva, S. R. da. Aplicação do sistema Betonbloc, como alternativa de contenção da erosão costeira no município de Ipojuca/PE: Application of the Betonbloc system, as an alternative to contain coastal erosion in the municipality of Ipojuca/PE. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 9, n. 1, p. 44-58, 2023. DOI:10.21680/2447-3359.2023v9n1ID31283. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregnet/article/view/31283>. Acesso em: 25. maio. 2023.
- Asmus, M. L. et al. Gestão costeira no Brasil: instrumentos, fragilidades e potencialidades. *Gerenciamento Costeiro Integrado*, Rio Grande, v. 4, p. 52-57, 2006. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/2053>. Acesso em: 07 fev. 2023.

- Bosom, E.; Jiménez, J. A. Storm-induced coastal hazard assessment at regional scale: application to Catalonia (NW Mediterranean). *Advances in Geosciences*, v. 26, p. 83-87, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/adgeo-26-83-2010>
- Brasil. (2022). *Zona Costeira e Marinha*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-aquatica/zona-costeira-e-marinha.html>. Acesso em: 03 mar 2023.
- Brasil. *Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira*. Brasília: GI-GERCO/CIRM, 2018.
- Brayshaw, S., Lemckert, C. (2012). Pitfalls of Shoreline Stabilisation – Tweed River Mouth, Gold Coast, Australia. In: COOPER, J., PILKEY, O. (eds) *Pitfalls of Shoreline Stabilization*. Coastal Research Library, vol 3. Springer, Dordrecht.
- Bulhões, Eduardo. Erosão costeira e soluções para a defesa do litoral. In: Muehe, D.; Lins-de-Barros, F. M.; Pinheiro, L. (orgs.) *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. 1. ed. Rio de Janeiro: PGGM, 2020.
- Bush, D. M. et al. *Living on the edge of the Gulf*. The west Florida and Alabama Coast. Duke University Press, Durhan and London, 2001.
- Bush, D. M. et al. Utilization of geoinicators for rapid assessment of coastal hazard risk and mitigation. *Ocean & Coastal Management*, v. 42, p. 647- 670, 1999. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0964-5691\(99\)00027-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0964-5691(99)00027-7)
- Ceccarellii, T. S. *Paradigmas para os projetos de obras marítimas no contexto das mudanças climáticas*. 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Universidade Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2009.
- Confessor, J.G.; Silva, L. E.U.; Araújo, P.M.S. Avaliação das Perdas de Água e Solo em Pastagens do Cerrado Brasileiro Utilizando Chuvas Simuladas. *Sociedade & Natureza*, v. 34, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-65618>
- Dean, R.G.; Dalrymple, R.A. *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge University Press, 2004.
- Dias, A. Litoral do Paraná conta com areia da praia renovada antes da data prevista. Agência Estadual de Notícias, 2022. In: Governo do Estado do Paraná. (2022). *Governo conclui a engorda da praia de Matinhos e entrega obra antes do prazo*. Desenvolvimento Sustentável. <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Governo-conclui-engorda-da-praia-de-Matinhos-e-entrega-obra-antes-do-prazo>. Acesso em: 28 fev 2023.
- Elias, E. P. L. et al. Understanding meso-scale processes at a mixed-energy tidal inlet: Ameland Inlet, the Netherlands – Implications for coastal maintenance. *Ocean Coast. Manag.* n.11, v. 222, p. 106-125, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106125>
- Firmino, L. A. C.; Alves, L. D. Percepção socioambiental da população sobre eventos de erosão costeira no litoral de Atafona, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Do Departamento De Geografia*, v. 41, n. 1, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.173598>
- Fischer, A.; Calliari, L. J. Proposta para recuperação das áreas afetadas por erosão na praia estuarina do Barro Duro – Laguna dos Patos/RS. In: II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, *Anais...* Rio Grande, p. 1-20, 2006
- Fischer, A.; Calliari, L. J. Proposta para recuperação das áreas afetadas por erosão na praia estuarina do Barro Duro – Laguna dos Patos/RS. In: II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2006, Rio Grande.
- Furtado, T. V.; Bonetti, J. Proposta metodológica para o mapeamento de danos causados por eventos extremos em praias densamente urbanizadas. *Arquivo de Ciências do Mar*, Fortaleza, v. 53, n. 2 (especial), p. 120-127, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.32360/acmar.v53iEspecial.42688>
- Gois, L. A. *A interferência das estruturas de proteção da costa na preservação dos sedimentos costeiros da praia de Bairro Novo, Olinda-PE*. 2018. 287 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- Gois, L. A. *Avaliação das opções de proteção costeira: praia de Boa Viagem, Recife-PE e praia de Bairro Novo, Olinda-PE*. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental para Recuperação de Ambientes Degradados) - Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP, Recife, 2011.
- Governo do Estado de São Paulo. Enrocamento. *Especificação Técnica*, p. 1-6, São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem, 2007.
- Governo do Estado do Paraná. (2021). *Edital da concorrência nº 002/2021*. PARANÁ: Curitiba, 2021.
- Hamm, L. et al. A Summary of European experience with shore nourishment. *Coastal Engineering*, v.47, n. 1, p. 237-264, 2002. Disponível em: https://www.academia.edu/2998869/A_summary_of_European_experience_with_shore_nourishment. Acesso em: 15 fev. 2023.
- Hegge B.; Eliot, I.; Hsu, J. Sheltered Sandy Beaches of Southwestern Austrália. *Journal of Coastal Research*, Flórida, v. 12, n. 3, p. 748-760, 1996. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4298521>. Acesso em: 05 fev. 2023.
- Lawson, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, v. 15, n. 6, p. 384-427, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1680/gein.2008.15.6.384>
- Lima, M. et al. Medidas de mitigação e adaptação à erosão costeira e aos efeitos das alterações climáticas. *Revista Recursos Hídricos*, v. 42, nº 1, p. 61-70, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.5894/rh42n1-cti7>

- Lyra, M. (2012). *Considerações Sobre Obras de Proteção Costeira: Espigões*. Disponível em: <http://marcolyra.blogspot.com/2012/10/consideracoes-sobre-obras-de-protecao.html>. Acesso em 10 mar. 2023.
- Meireles, T; Souza, I. (2017). Mapa de áreas e ações prioritárias na Zona Costeira e Marinha do Brasil foram debatidas nos dias 30/11 e 01/12. In: *WWF-Brasil e CI apoiam revisão da Zona Costeira e Marinha do País*. WWF-BRASIL, 2021. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?62542/WWF-Brasil-e-CI-apoiam-revisao-da-Zona-Costeira-e-Marinha-do-pais>. Acesso em: 03 mar 2023.
- Menezes, A. F.; Pereira, P. S.; Gonçalves, R. M. Uso de Geoindicadores para Avaliação da Vulnerabilidade à Erosão Costeira Através de Sistemas de Informações Geográficas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 11, n. 1, p. 276-296, 2018. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.1.p276-296>.
- Nordstron, K. F. *Estuarine Beaches: an introduction to the physical and human factors affecting use and management of beaches in estuaries, lagoons, bays and fjords*. New York: Elsevier Science Publishers Ltd, 1992.
- Patriota, E. G. *Análise da proposta de intervenção para o processo erosivo da falésia do Cabo Branco, João Pessoa-PB*. 2021. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.
- Pellizzon, G. (2019) Espigões receberão investimentos privados. In: Barros, L. Diário do Nordeste. (2019). *Cinco espaços da orla devem ser concedidos à iniciativa privada*. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/politica/cinco-espacos-da-orla-devem-ser-concedidos-a-iniciativa-privada-1.2172143>. Acesso em: 28 fev 2023.
- Possebon, L. C. et al. Estudo sobre o impacto do clima de ondas nos processos erosivos da costa do município de Vera Cruz (BA), Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 01, p. 325-342, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p325-342>
- Prata, P. M. Obras de contenção de processos erosivos e medidas mitigadoras, 2018. In: *Curso Básico de Percepção de Risco Geológico*, Coordenação de Gestão Costeira e o Territorial (IEMA), Secretaria de Meio Ambiente, Vitória, 2018.
- Prefeitura Municipal Angra dos Reis. (2021). *Edital da tomada de preços nº 032/2021*. Rio de Janeiro: Angra dos Reis, 2021.
- Prefeitura Municipal Balneário Piçarras. (2023). *Edital da tomada de preços nº 002/2023*. SANTA CATARINA: Balneário Piçarras, 2023.
- Prefeitura Municipal de Fortaleza. (2019). *Prefeitura de Fortaleza lança edital de PMI para o espigão da João Cordeiro*. Disponível em: <https://fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-lanca-edital-de-mpi-para-o-espigao-da-joao-cordeiro>. Acesso em: 09 de Mar. 2023.
- Prefeitura Municipal do Paulista. (2013). Secretaria de Administração. *Edital da concorrência nº 001/2013*. Pernambuco: Superintendência de Licitações, 2013.
- Press, F. et al. *Para Entender a Terra*. 4ª. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- Ramos, L. *Diagnóstico dos processos de erosão costeira em um período de 35 anos (1985 - 2020) em relação à atividade de exploração de petróleo em terra no Rio Grande do Norte*. 2021. 26 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar) - Universidade Federal de São Paulo, Santos, 2021.
- Rosati, J. D. Concepts in Sediment Budgets. *Journal of Coastal Research*. v. 212, n. 1, p. 307-322, 2005. DOI: <https://doi.org/10.2112/02-475A.1>
- Saathoff, F.; Witte J. Use of geotextile containers for stabilizing the scour embankments at the Eidersperwerk. *Geosynthetics World*, v. 5, n. 2, p. 1-65, 1995. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/238661404_Environmental_Benefits_of_Sand_Filled_Geotextile_Structures_for_Coastal_Applications. Acesso em: 05 mar. 2023.
- Sila, I. G.; Moraes, F. S.; Struminski, E. Comparação de técnicas de contenção de ondas. *Ciências exatas e tecnológicas*, v. 4, n.3, p. 25-34, Alagoas, 2018. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/5563>. Acesso em: 25 fev. 2023.
- Silva, E. P. et al. Uso do solo e caracterização morfométrica como subsídios para análise das áreas de alagamento e da qualidade da água nas microbacias do Macambira e Cascavel, Goiânia-GO. *Ciência e Natura*, v. 41, p. e59, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X38425>
- Sousa, H. V. C. M. de; Moura, F. J. M. de; Souza, A. C. D. Proposições de gestão ambiental na zona costeira de Icarai de Amontada (CE), Nordeste, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, [S. l.], v. 43, p. e189549, 2023. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.189549. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/189549>. Acesso em: 26 maio. 2023.
- Souza, M. A. L. Benefícios Ambientais no Controle de Erosão Costeira com o uso do Dissipador de Energia “Bagwall” no Litoral de Alagoas. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 8, n. 2, p. 139-148, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.32360/acmar.v49i2.6581>
- Teixeira, A. C. de O.; DE Almeida, T. M.; Lavenère-Wanderley, A. A. O. Erosão costeira na praia de São Miguel, Ilhéus-BA. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, MG, v. 12, n. 38, p. 108-122, 2011. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG123816344>
- Vasconcelos, R. G. F. *Estudo do fenômeno da erosão marinha na praia de Icarai no município de Caucaia-Ceará*. 2010. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Segurança Pública e Defesa Civil), Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza (FAMETRO), Fortaleza, 2010.

Revista de Gestão Costeira Integrada

Journal of Integrated Coastal
Zone Management

