

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 91ª 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

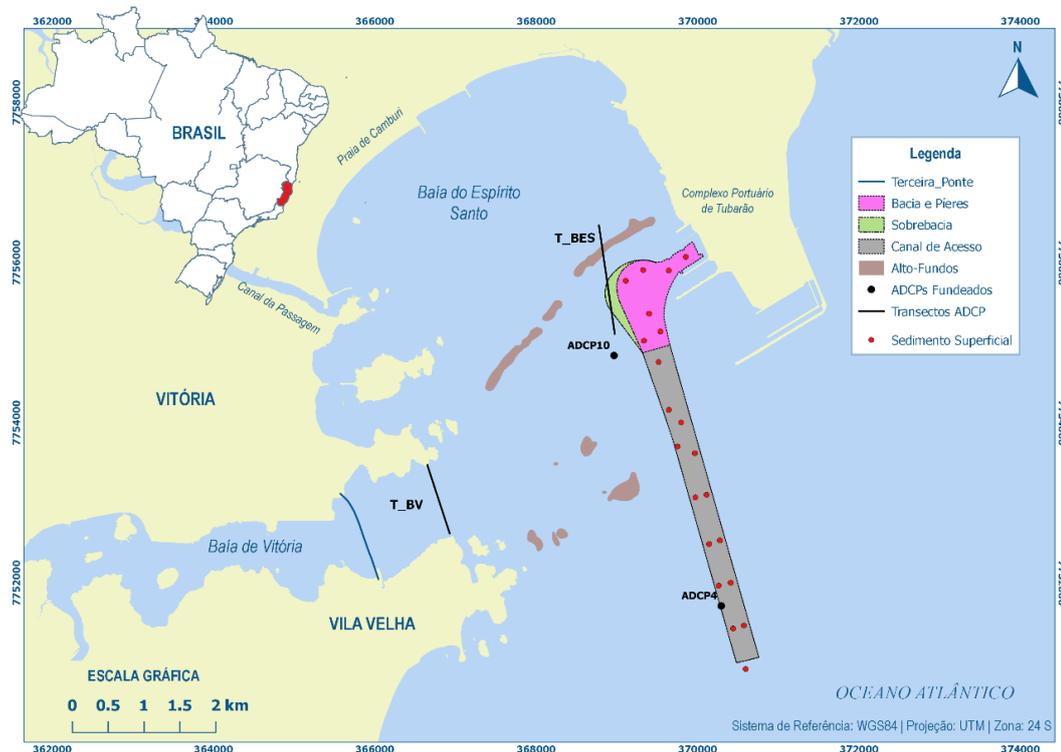


Figura 1. Delimitação da geometria onde os dados batimétricos históricos foram comparados no Porto de Tubarão (áreas rosa, verde e cinza), bem como localização dos pontos de fundeio (pontos pretos) e transectos (linhas pretas) realizados com ADCPs para análise da hidrodinâmica. Os locais de amostragem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

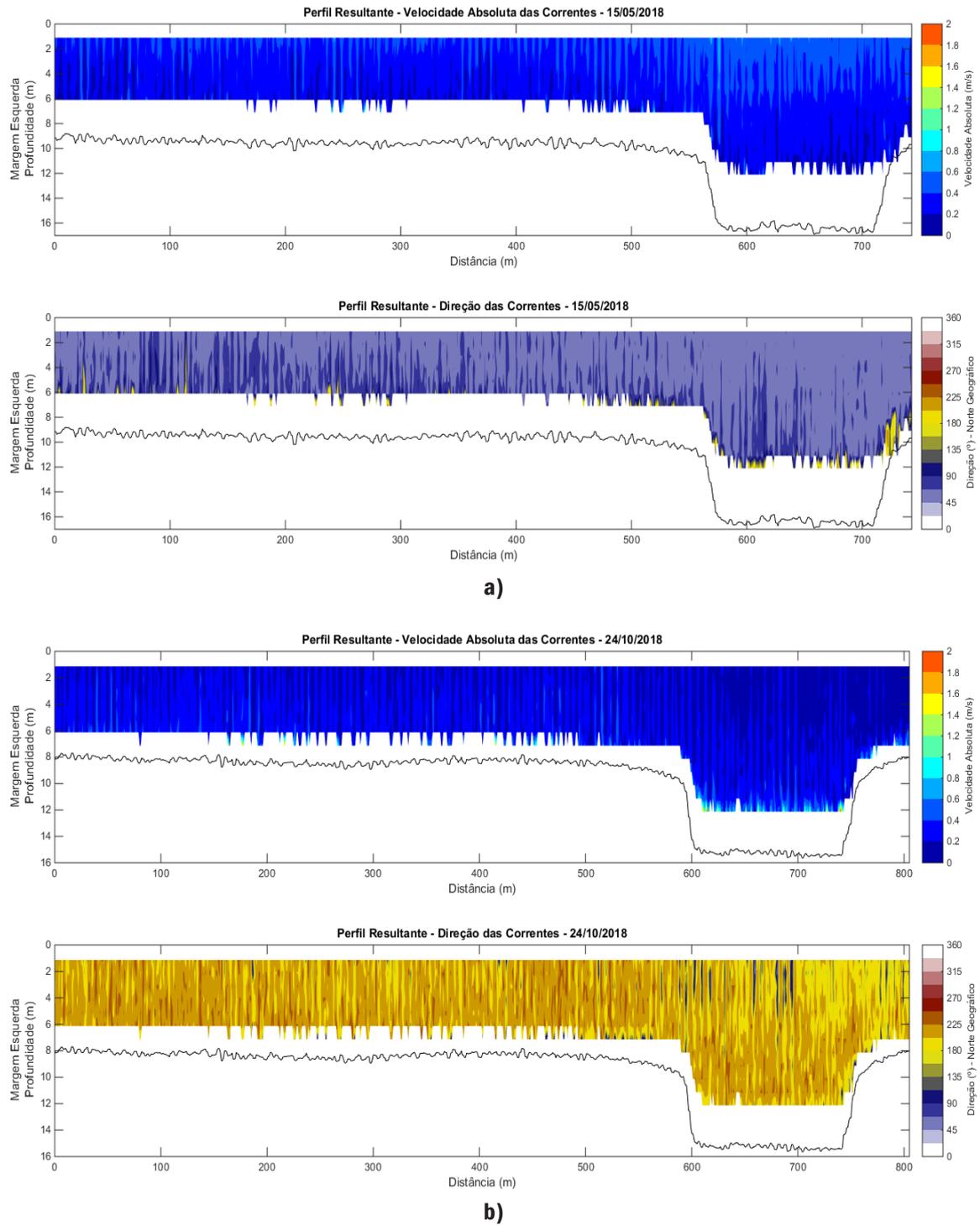
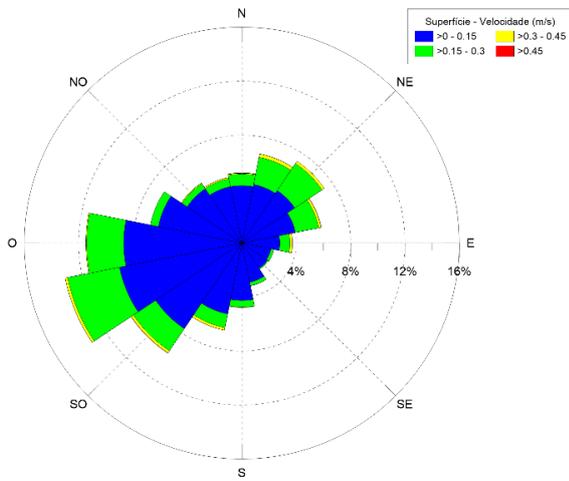
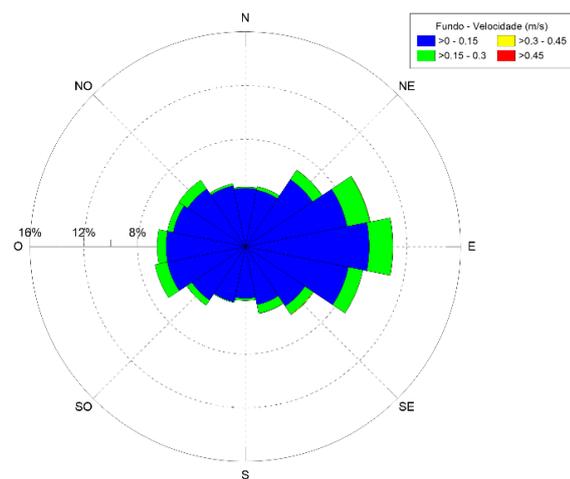
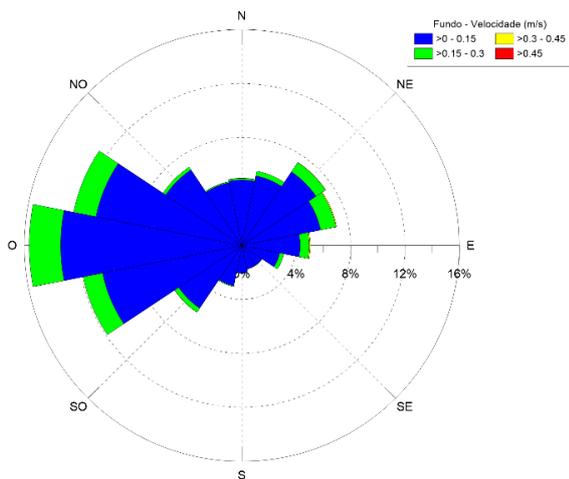
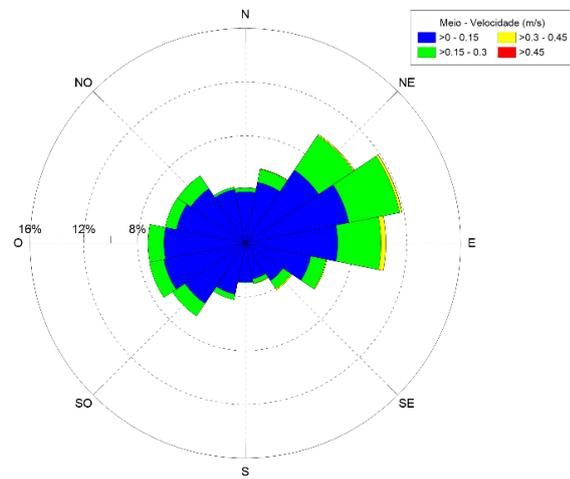
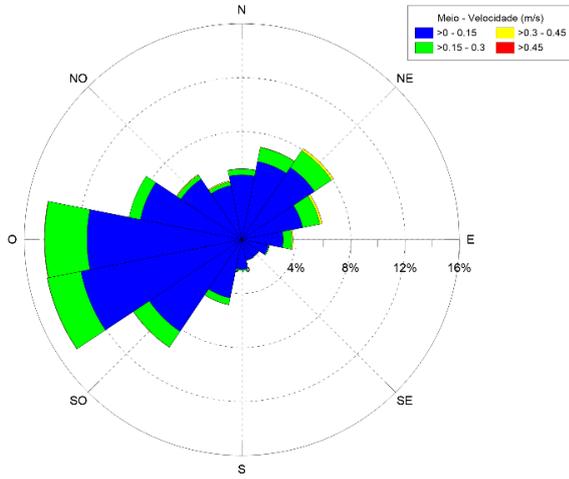
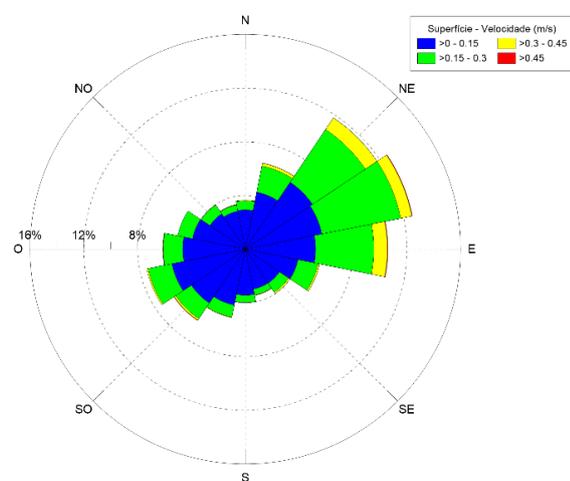


Figura 2. Perfis resultantes da velocidade e direção das correntes residuais observadas na desembocadura da BV nos períodos chuvoso (a) e seco (b).

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

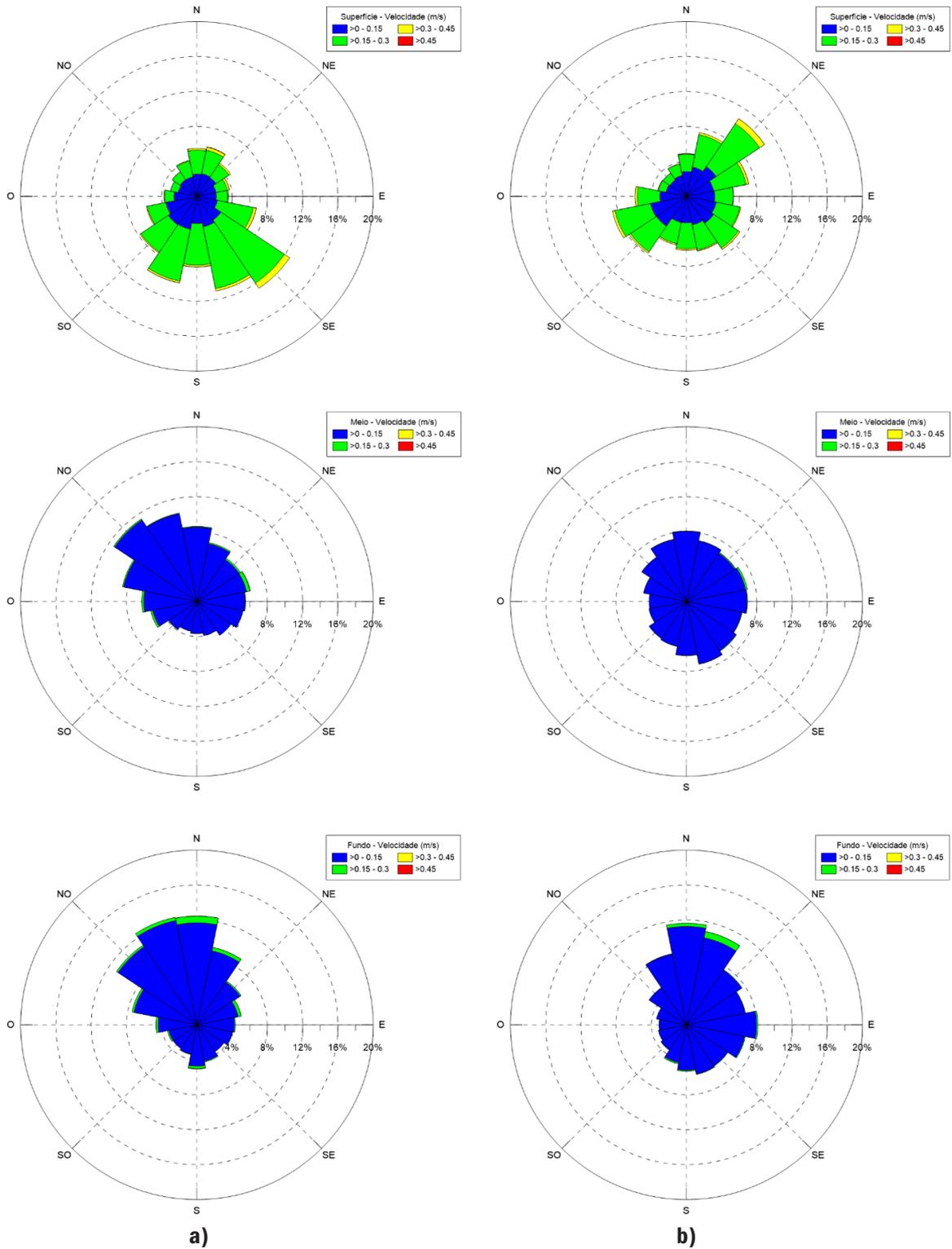


Figura 4 – Padrão de correntes médias observadas no ADCP10 entre março de 2019 a julho de 2020 ao longo da coluna d’água (superfície, meio e fundo), sendo: (a) durante a atuação de ondas incidentes de E-SE e (b) para durante ondas incidentes de SE-S.

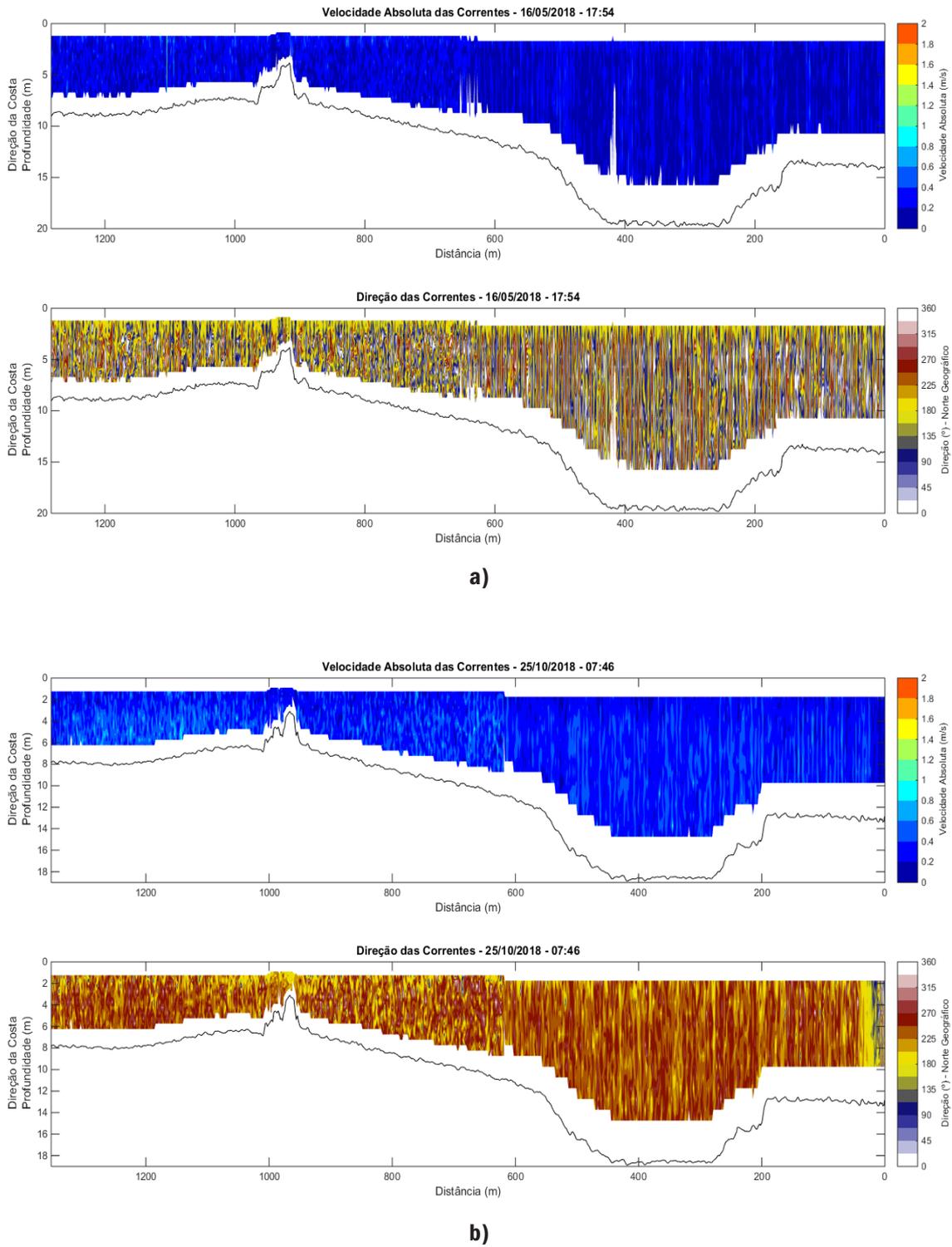


Figura 5. Perfis de velocidade e direção das correntes BES durante o período chuvoso com atuação de ondas de SE-S e seco com atuação de ondas de E-SE, sendo representados por (a) chuvoso na máxima vazante, (b) seco na máxima vazante, (c) chuvoso na máxima enchente e (d) seco na máxima enchente.

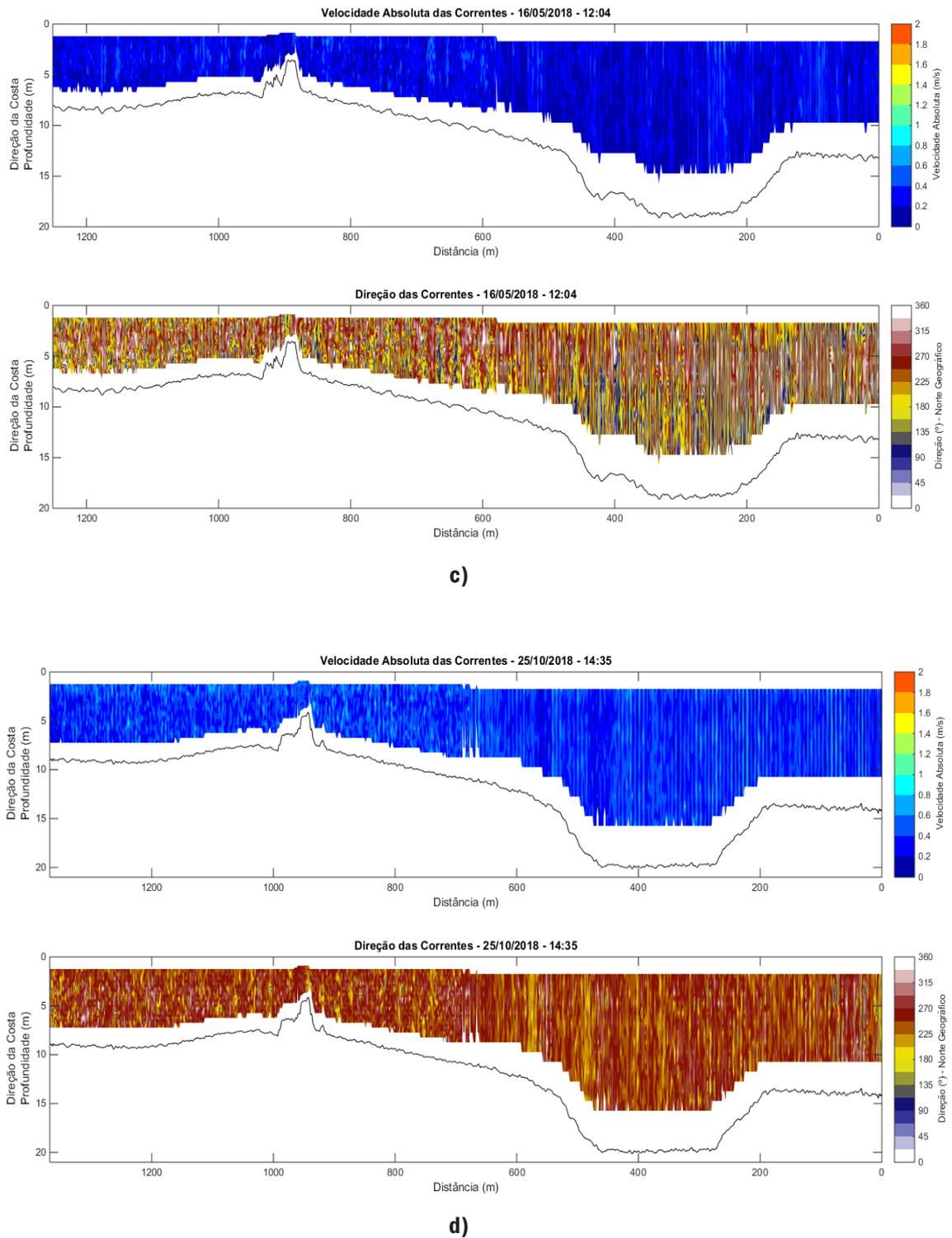


Figura 5. (continuação) Perfis de velocidade e direção das correntes BES durante o período chuvoso com atuação de ondas de SE-S e seco com atuação de ondas de E-SE, sendo representados por (a) chuvoso na máxima vazante, (b) seco na máxima vazante, (c) chuvoso na máxima enchente e (d) seco na máxima enchente.

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

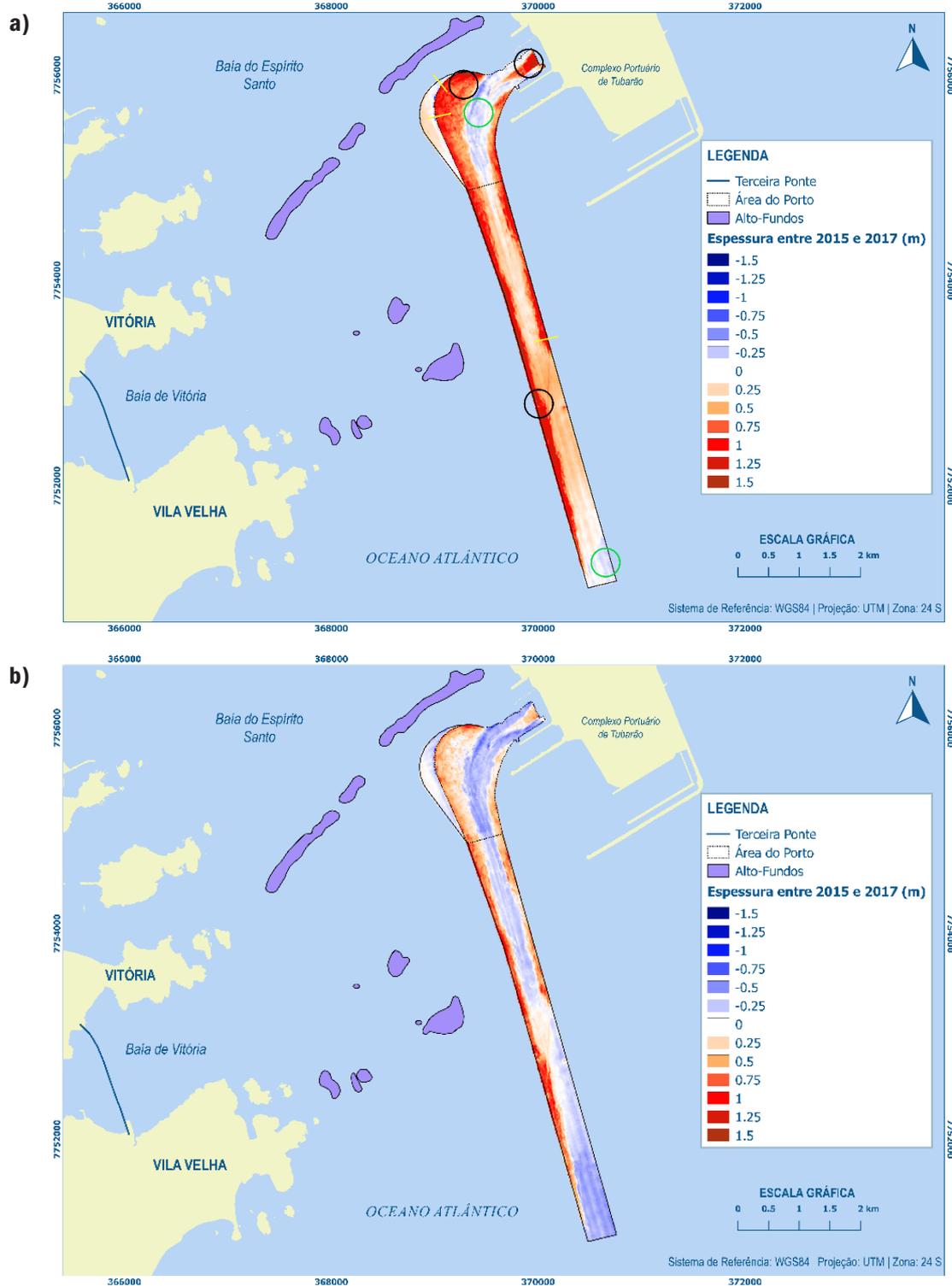


Figura 6. Espessura de sedimento colmatado no Porto de Tubarão entre julho de 2015 a abril de 2018 (a), apresentando diferentes padrões para taxas de assoreamento entre julho de 2015 e abril de 2017 (b) e maio de 2017 a abril de 2018 (c). As áreas de maior acreção e erosão de sedimento são indicadas 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).

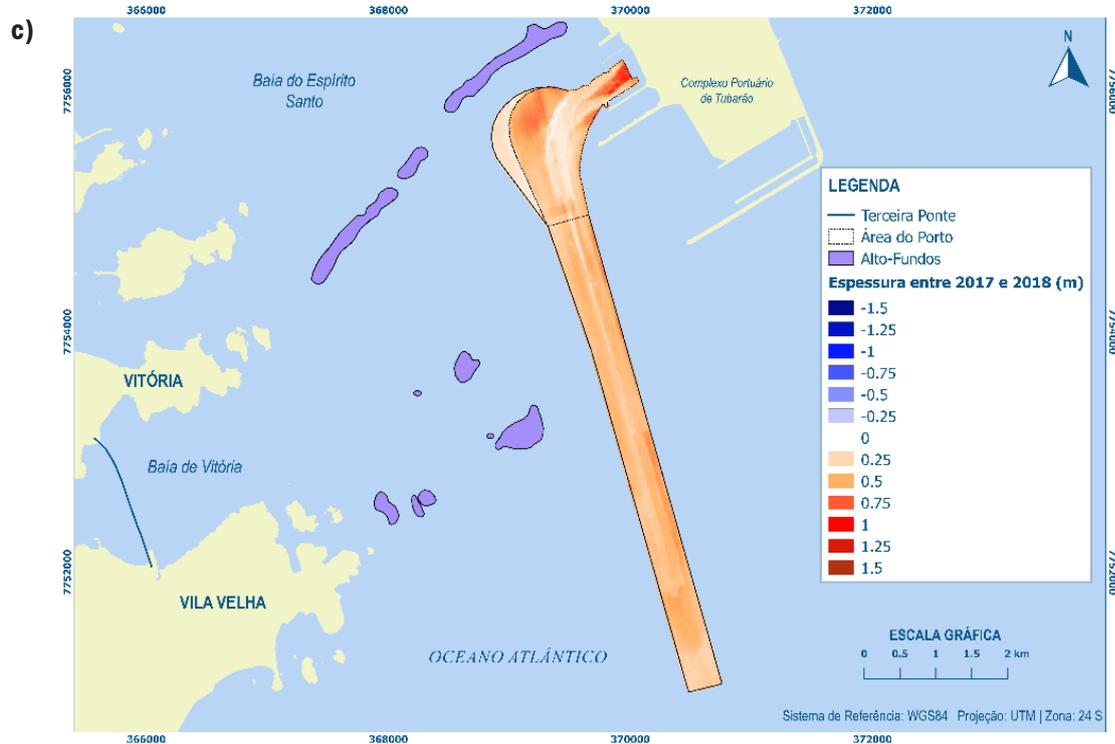


Figura 6. (continuação) Espessura de sedimento colmatado no Porto de Tubarão entre julho de 2015 a abril de 2018 (a), apresentando diferentes padrões para taxas de assoreamento entre julho de 2015 e abril de 2017 (b) e maio de 2017 a abril de 2018 (c). As áreas de maior acreção e erosão de sedimento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

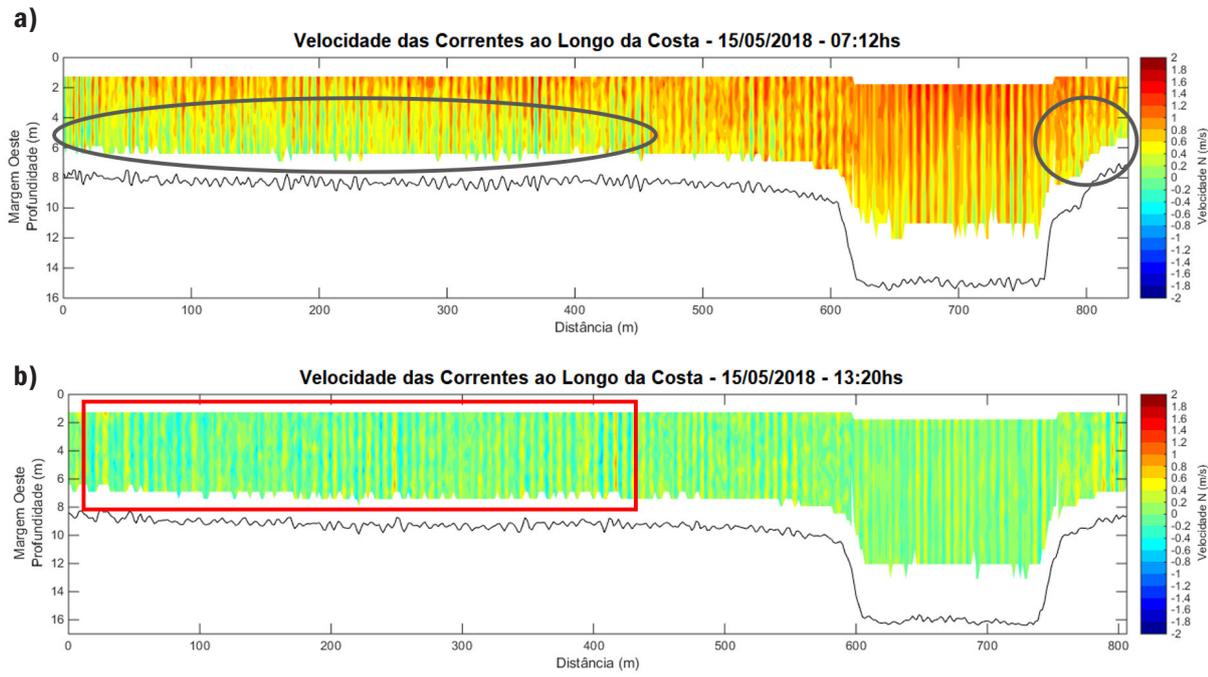


Figura 7. Velocidade ao longo da costa na desembocadura da BV durante o período chuvoso na maré vazante (a) e enchente (b). Os círculos pretos indicam as regiões com a maior presença de correntes para dentro da BV durante a maré vazante e o retângulo vermelho indica a região com mais correntes para dentro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

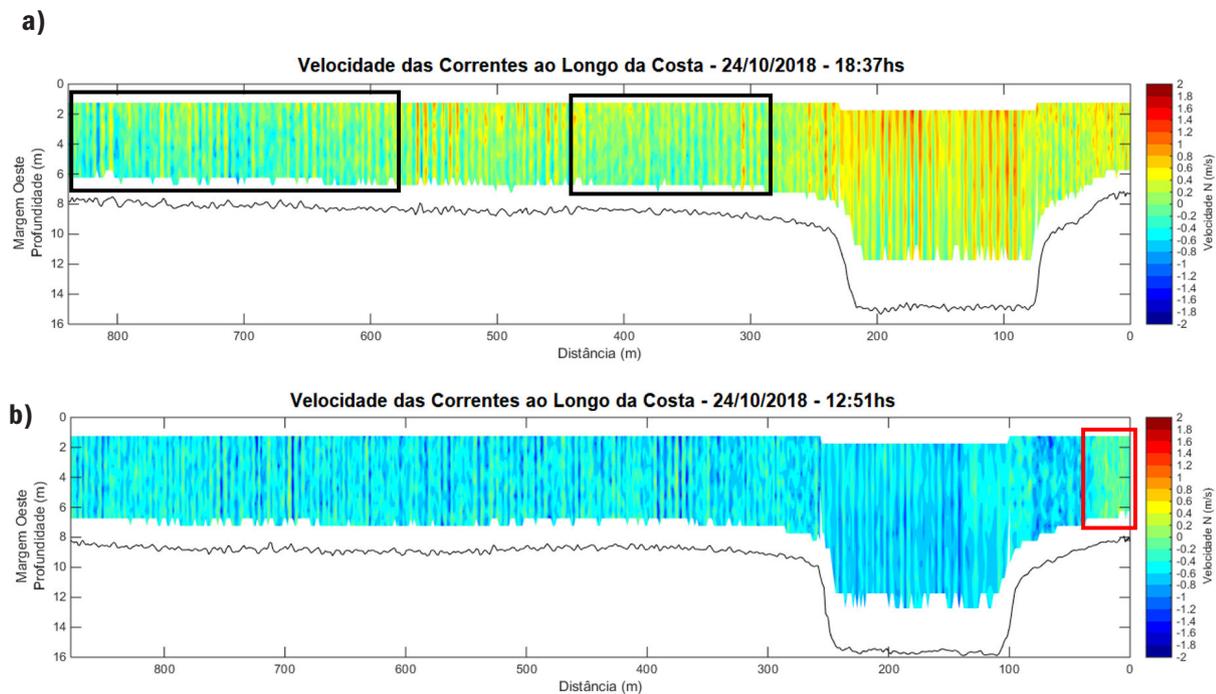


Figura 8. Velocidade ao longo da costa na desembocadura da BV durante o período seco na maré vazante (a) e enchente (b). Os retângulos pretos indicam as regiões com a maior presença de correntes para dentro da BV durante a maré vazante e o retângulo vermelho indica a região com mais correntes para fora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

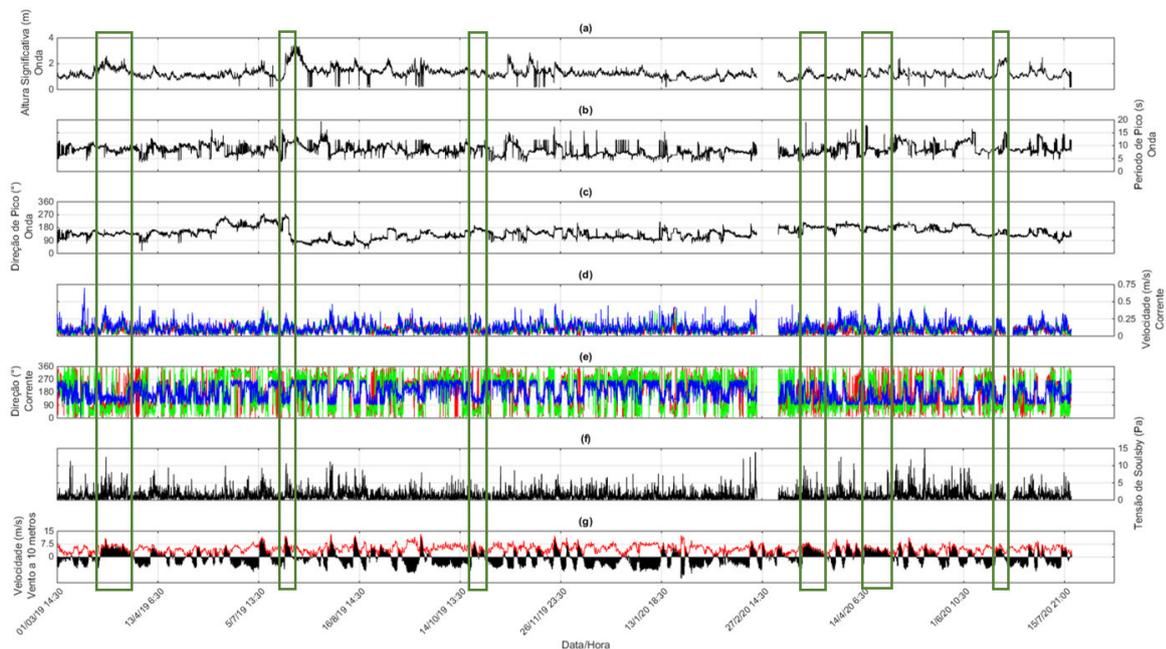


Figura 9. Integração dos dados hidrodinâmicos coletados entre março de 2019 e julho de 2020 na entrada da Baía do Espírito Santo pelo ADCP4. São apresentados dados de altura significativa (a), período de pico (b) e direção de pico (c) das ondas, além da velocidade (d) e direção das correntes (e) de superfície (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.

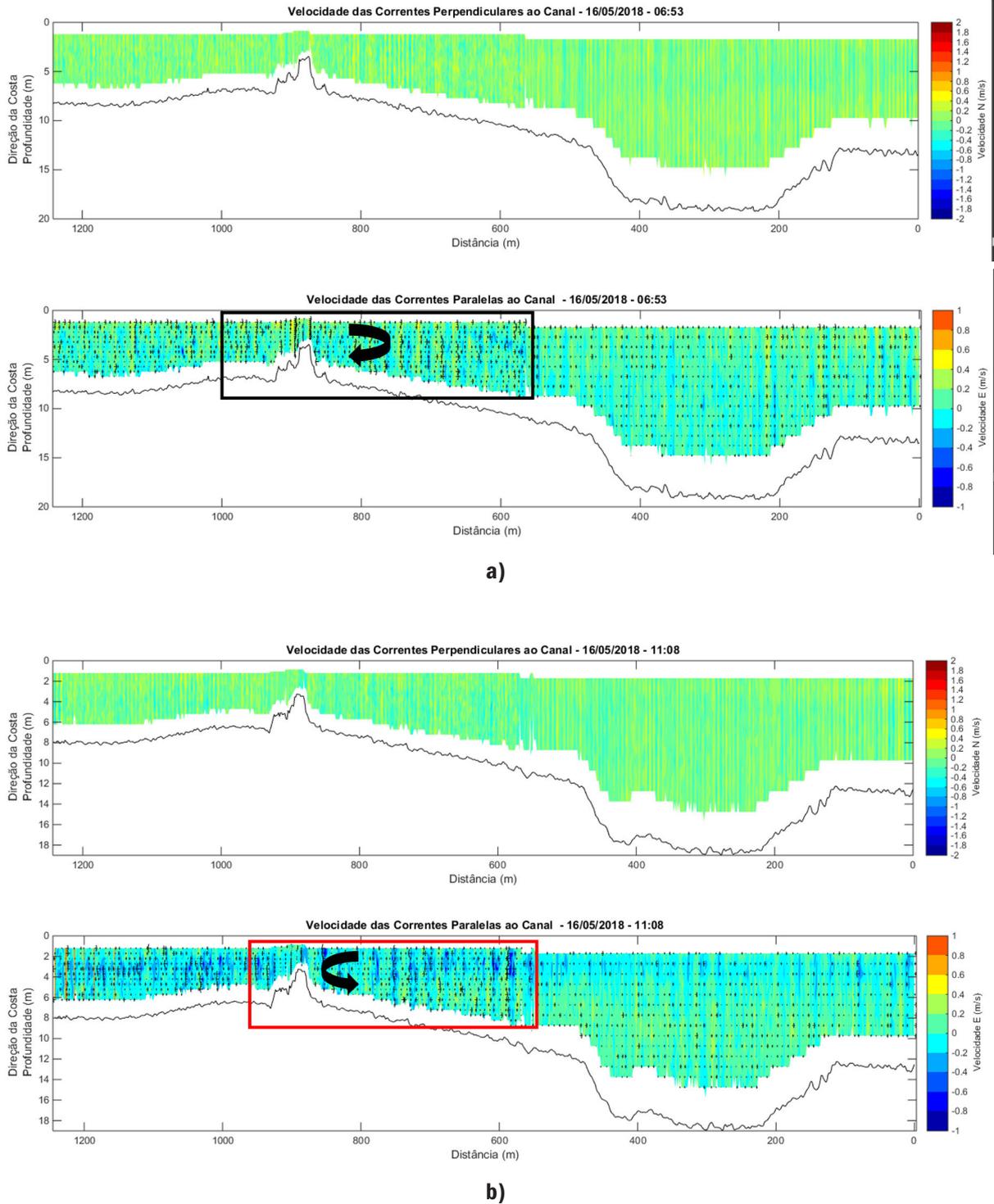


Figura 10. Perfis de velocidade das correntes perpendiculares e paralelas ao Canal de Acesso do Porto de Tubarão, durante as marés vazante (a) e enchente (b) do dia 16/05/2018. Retângulo preto indica área com maior intensidade das correntes e presença de vórtices. Já o retângulo vermelho apresenta área 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).

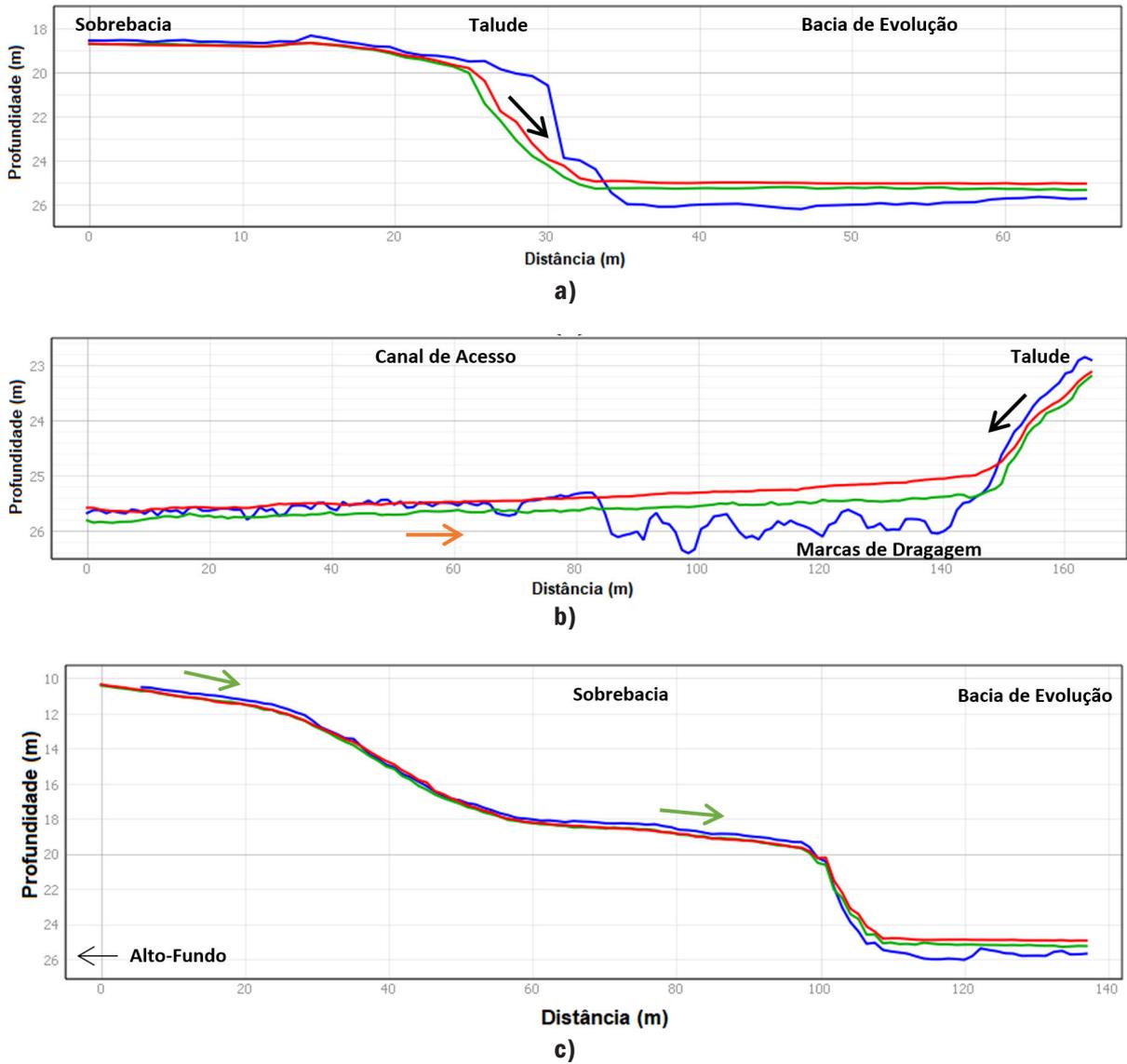


Figura 11. Perfis de profundidade traçados no talude entre a sobrebacía e Bacia de Evolução (a,c) e no talude do Canal de Acesso (b), conforme localizações apresentadas na Figura 6. A linha azul representa o levantamento realizado pós-dragagem em junho de 2015, enquanto as linhas verde e vermelha apresentam 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 sobrebacía) 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 sobrebaía, 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

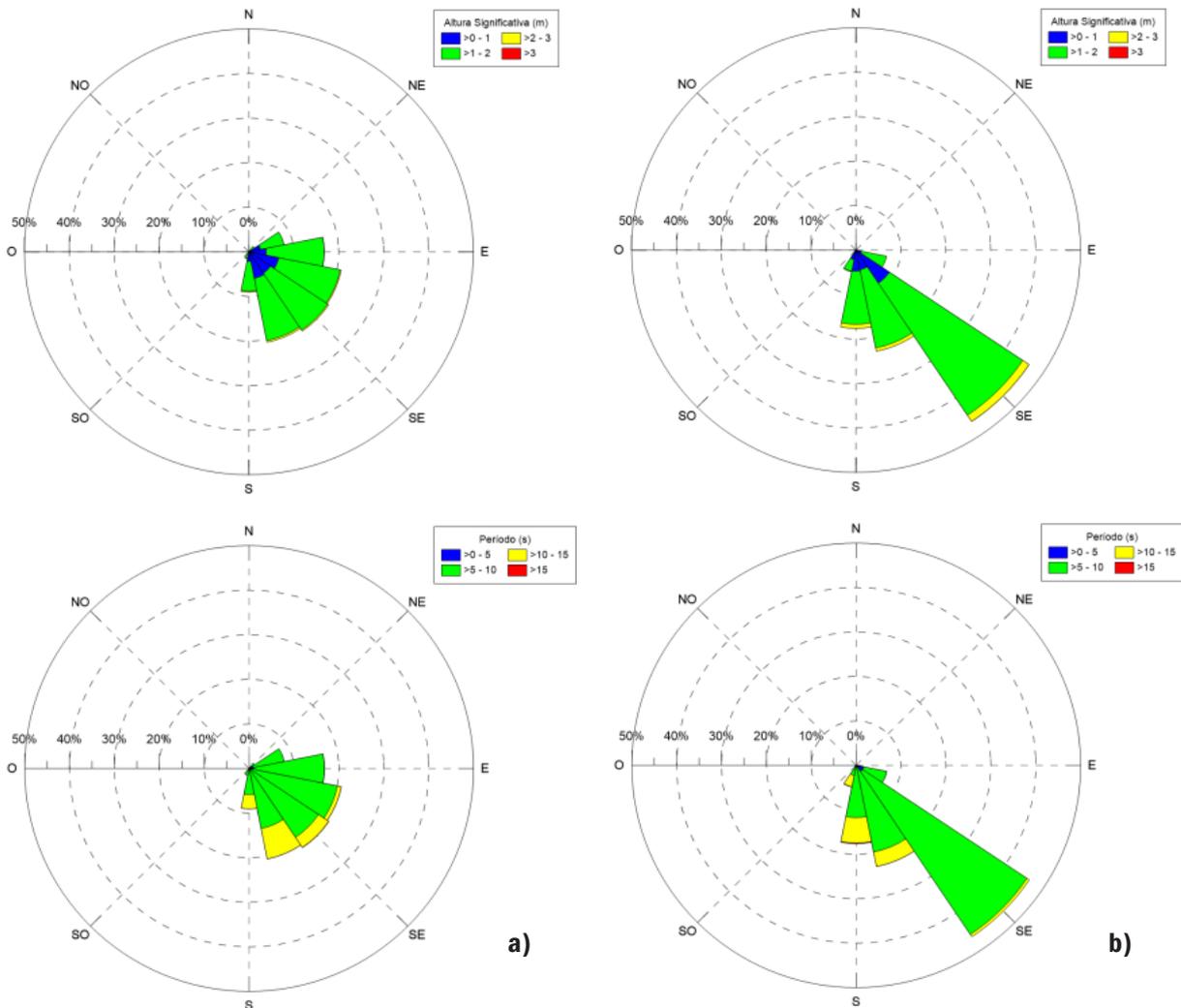


Figura 12. Padrão de altura significativa e período de pico das ondas observadas pelo ADCP4 localizado na entrada da BES entre (a) julho de 2015 a abril de 2017 e (b) maio de 2017 a abril de 2018.

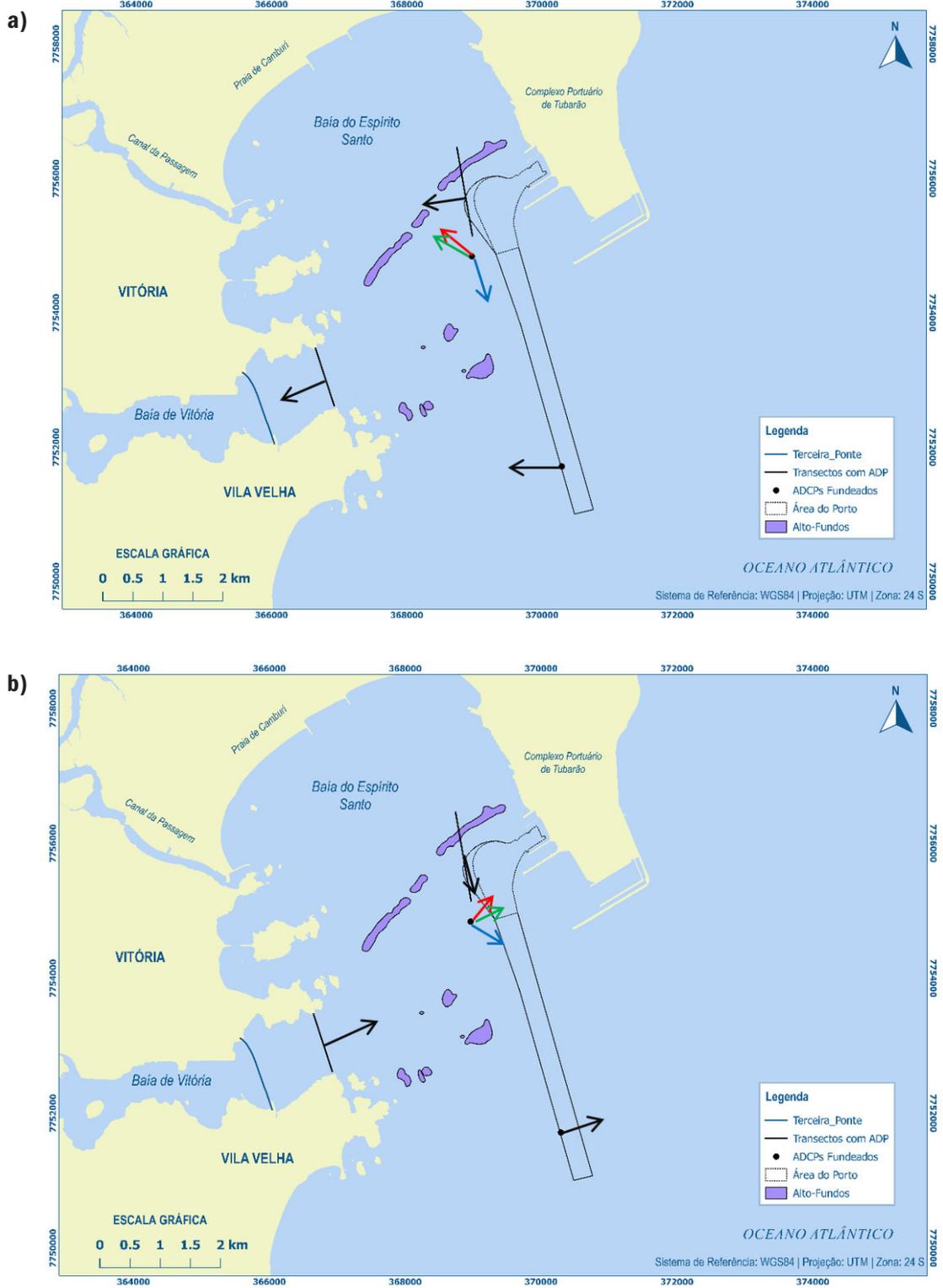


Figura 13. Circulação resultante na BES e BV em condições de onda de E-SE e baixa pluviosidade (a), e sob influência de ondas de SE-S e alta pluviosidade (b). As setas azuis, verdes, vermelhas e pretas indicam a direção resultante das correntes na superfície, meio, fundo e a partir da integração da coluna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

