



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

RUDNEY DA SILVA SOUSA

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE OPERACIONAL DE ÁREA
DE DESPEJO DE DRAGAGEM PORTUÁRIA NO COMPLEXO ESTUARINO
DE SÃO MARCOS**

São Luís – MA

2024

RUDNEY DA SILVA SOUSA

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE OPERACIONAL DE ÁREA
DE DESPEJO DE DRAGAGEM PORTUÁRIA NO COMPLEXO ESTUARINO
DE SÃO MARCOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Orientador: Dr. Francisco José da Silva Dias

São Luís – MA

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Sousa, Rudney da Silva.

Avaliação da Capacidade de Suporte Operacional de Área de Despejo de Dragagem Portuária No Complexo Estuarino de São Marcos / Rudney da Silva Sousa. - 2024.

69 f.

Orientador(a): Francisco José da Silva Dias.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Ma, 2024.

1. Dragagem Portuária. 2. Despejo de Dragagem. 3. Transporte de Sedimentos. 4. Área de Despejo. 5. . I. Dias, Francisco José da Silva. II. Título.

RUDNEY DA SILVA SOUSA

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE OPERACIONAL DE ÁREA
DE DESPEJO DE DRAGAGEM PORTUÁRIA NO COMPLEXO ESTUARINO
DE SÃO MARCOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Julgada em: 04/06/2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Orientador

Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Junior
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Membro Externo ao Programa

São Luís – MA

2024

“Senhor, fazei com que eu procure mais [...] compreender
do que se compreendido.” (São Francisco de Assis)

Maré enche e maré vaza. (ditado popular)

Dedico este trabalho às mulheres da minha vida: Amélia Maria Mota,
esposa; Anna Maria e Maria Júlia, filhas; e Rosalina, mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder a oportunidade de cruzar esse desafio e concluí-lo com todo aprendizado e conquistas.

Agradeço às minha Marias: esposa Amélia Maria Mota e filhas Anna Maria e Maria Júlia por todo apoio, compreensão e renúncias em detrimento deste trabalho, muito obrigado. Sem vocês não teria conseguido chegar até aqui. Amo vocês.

Agradeço à minha família fisicamente distante, mas sempre presente: minha mãe Rosalina, que sempre lutou para que os filhos, de ventre ou do coração, tivessem uma educação libertadora. A meu pai (*in memoriam*), pelo exemplo que o trabalho sempre tem suas recompensas. A meus irmãos, sanguíneos e de coração, que sempre incentivaram e torceram por mim. Amo todos vocês.

Agradeço ao orientador professor Dr. Francisco José Dias (Franzé) pela oportunidade de participar do LHiCEAI, pelos direcionamentos, ensinamentos e paciência neste trabalho. Além dos ensinamentos, os cafés e conversas não serão esquecidos, obrigado.

Agradeço ao professor Dr. Audálio Torres pelas contribuições na pesquisa e pelas perguntas desafiadoras, obrigado.

Agradeço aos demais professores pelos ensinamentos e orientações, obrigado.

Agradeço aos colegas de LHiCEAI: Vivian, pelo incentivo ao ingresso e continuidade na pesquisa; Hugo, pelo apoio nos embarques, na imensa ajuda no tratamento dos dados e infundável paciência nas explicações; Rômulo, pelo apoio logístico nos fundeios; Kassandra, pelo apoio nos dados de sedimentos; e MPS, obrigado.

Agradeço aos colegas de turma, mesmo na distância imposta pelas condições de saúde, a troca de informações foi importante, obrigado.

Agradeço à EMAP pela cessão dos dados de batimetria e dragagem cabais à pesquisa, obrigado.

Agradeço aos amigos de trabalho que me apoiaram e incentivaram. Os frutos da pesquisa são nossos, obrigado.

Agradeço à UFMA pela infraestrutura e financiamento dos fundeios e pesquisas de laboratório, obrigado.

RESUMO

As atividades de dragagem no Complexo Portuário de São Luís são fundamentais para a continuidade das operações e também para o aumento das movimentações portuárias. A área de despejo de dragagem desse Complexo Portuário pode estar sofrendo assoreamento e comprometendo a segurança da navegação, pois o local está situado numa das áreas de fundeio de navios dentro do Complexo Estuarino de São Marcos. Este trabalho teve por objetivo determinar a capacidade de suporte operacional e a taxa de assoreamento pela deposição de material dragado da Área de Despejo do Complexo Estuarino. Os dados para a caracterização da hidrodinâmica, sedimento e material particulado em suspensão foram obtidos em duas campanhas hidrográficas realizadas por 72 horas consecutivas em maré de sizígia nos períodos chuvoso e seco de 2023 no centro da Área de Despejo. Os Levantamentos Hidrográficos de Batimetria da área estudada de 2017 a 2023 foram disponibilizados pela Empresa Maranhense de Administração Portuária com os relatórios de monitoramento de dragagem do Porto do Itaqui. Os dados de dragagem do Terminal Marítimo Ponta da Madeira de 2018 a 2023 foram obtidos junto ao IBAMA. Após tratamento estatístico dos dados de velocidade, maré, salinidade, oxigênio dissolvido e temperatura coleados nas 144 horas de fundeio das 576 amostras de água para determinação do material particulado em suspensão e das 20 amostras de sedimentos nas instalações do Instituto Ciências do Mar foi possível afirmar que a Área de Despejo possui alta hidrodinâmica com baixa estratificação. A anomalia dos dados dos Levantamentos Hidrográficos de Batimetria com os dados dos relatórios de dragagem apontou que os despejos de material ocorreram com um média de $44.047 \text{ m}^3 \text{ mês}^{-1}$ e a área teve uma taxa de erosão de $43.230 \text{ m}^3 \text{ mês}^{-1}$ assinalando um leve assoreamento no período analisado. A dragagem de aprofundamento no Itaqui, com a retirada de mais de 312 mil m^3 de material num intervalo 16 dias de 2022, obteve significativa influência nesse assoreamento.

Palavras-chave: dragagem portuária; despejo de dragagem; transporte de sedimentos; área de despejo.

ABSTRACT

Dredging activities at the Port Complex in São Luís are essential for the continuity of operations and for the increase in port movements. The dredging dump area of Port Complex can be suffering from silting up and compromising the navigation safety, as the site is located within one of the ship anchoring areas within the Estuarine Complex in São Marcos. Therefore, this work aimed to determine the operational support capacity and the silting up rate due to the dredged material built-up from the Estuarine Complex Dump Area. The data for the characterization of hydrodynamics, sediment and particulate matter in suspension were obtained in two hydrographic campaigns carried out for 72 consecutive hours in spring tides in the rainy and dry periods in 2023 in the center of the Dump Area. The Hydrographic Surveys of Bathymetry of the studied area from 2017 to 2023 were released by Maranhão Port Administration Company along with the dredging monitoring reports from Itaqui Port. Dredging data from Ponta da Madeira Maritime Terminal from 2018 to 2023 were obtained from the Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources. After statistical treatment of speed data, tide, salinity, dissolved oxygen and temperature collected during the 144 hours of anchoring, from 576 water samples to determine suspended particulate matter and from 20 sediment samples, in the Marine Sciences Institute Facilities, it was possible to state that the Dumping Area has high hydrodynamics with low stratification. The anomaly of the Hydrographic Surveys of Bathymetry data with the data from the dredging reports indicated that the dumping of material occurred with an average of 44,047 m³ month⁻¹ and the area had an erosion rate of 43,230 m³ month⁻¹, indicating slight silting in the period analyzed. However, it is worth highlighting that the deepening dredging in Itaqui, with the removal of more than 312 thousand m³ of material within 16 days in 2022, most likely had a significant influence on the mentioned silting.

Keywords: port dredging; dredging dump; sediment transport; dump area.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Complexo Estuarino de São Marcos.....	19
Figura 2 – Mapa das Bacias e Sistemas Hidrográficos do Maranhão.	20
Figura 3 – Localização do CESM, Ilha de São Luís, TMPM, Porto do Itaqui, Porto da Alumar, Área de Fundeio, Áreas de Despejo do TMPM e do Itaqui e ponto de fundeio das campanhas hidrográficas.....	Erro! Indicador não definido. 1
Figura 4 – Média histórica de pluviosidade de 1981 a 2022 (linha) com desvio e barras da precipitação em 2023	25
Figura 5 – Amostras de água da coleta C-28, do dia 15 set.. 2023 às 12 h de superfície e fundo para determinação de MPS.....	29
Figura 6 – Lançamento do CTD para coleta de dados	Erro! Indicador não definido.
Figura 7 – Localização dos 10 pontos de coleta de sedimentos e do ponto de fundeio das campanhas hidrográficas	311
Figura 8 – Amostrador tipo Gibbs.....	32
Figura 9 – Ficha de redução da Estação Maregráfica do Itaqui	33
Figura 10 – Diagrama de classificação da dinâmica do estuário pela composição granulométrica	41
Figura 11 – Redução do Levantamento Batimétrico de jul. 2023 à Área de Despejo do Itaqui.....	433
Figura 12 – Variação temporal: maré (A), velocidade longitudinal (B), temperatura (C), salinidade (D), oxigênio dissolvido (E) e MPS (F) no fundeio de chuva, de 21 a 24 mar. 2023	476
Figura 13 – Velocidade média em m s-1 na coluna d'água no fundeio no período de chuva	Erro! Indicador não definido. 7
Figura 14 – Velocidade média em m s-1 na coluna d'água no fundeio no período de seca ...	499
Figura 15 – Variação temporal: maré (A), velocidade longitudinal (B), temperatura (C), salinidade (D), oxigênio dissolvido (E) e MPS (F) no fundeio de seca, de 14 a 17 set. 2023.....	51
Figura 16 – Número de Richardson por Camada (Ri_L) apontado grande estratificação do estuário nas campanhas de chuva (A) e seca (B) no ponto de fundeio.....	522
Figura 17 – Granulometria predominante das 10 amostras de sedimentos coletadas no período de chuva (azul) e de seca (marrom).....	544

Figura 18 – Diagrama de Pejrup das 20 amostras coletadas nos 10 pontos no período de chuva e no período de seca	555
Figura 19 – Batimetrias de mar./2017 (A), maio/2019 (B), dez./2021, dez./2022 e nov./2023	577
Figura 20 – Anomalia: mar./2017-maio/2019 (A); maio/2019-dez./2021 (B); dez./2021-dez./2022 (C); e dez./2022-dez./2023 (D).	622
Figura 21 – Área de despejo utilizada durante a dragagem de aprofundamento no Itaqui entre mar. e abr. 2022. A área subdividida em malha com 14 seções para o despejo. A linha preta e o ponto azul apresentam o deslocamento do barça e despejo realizado no centro da zona 13, respectivamente.	633

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vértices dos polígonos da Área de Fundeio nº 8, Área de Despejo do Itaqui e Área de Despejo do TMPM (Datam WGS84).....	283
Tabela 2 – Períodos amostrais.....	28
Tabela 3 – Pontos de coleta de sedimentos.....	31
Tabela 4 – Valores de filtro para dados espúrios.....	333
Tabela 5 – Classificação granulométrica e abertura das peneiras.....	399
Tabela 6 – Escala de grau de seleção Folk e Ward a partir da classificação granulométrica...	40
Tabela 7 – Taxa de material depositado na cisterna de uma draga hopper para areias.....	444
Tabela 8 – Volumes mensais dragados no TMPM em m ³	588
Tabela 9 – Volumes dragados para manutenção do Porto do Itaqui em m ³	599
Tabela 10 – Volume (m ³) mensal despejado na Área de Despejo do Itaqui.....	599
Tabela 11 – Período de comparação entre os LHB.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	ÁREA DE ESTUDO	19
2.1	Localização	19
2.1.1	Complexo Estuarino de São Marcos	19
2.1.2	Complexo Portuário de São Luís	21
2.2	Aspectos Climatológicos	25
2.3	Características Hidrodinâmicas	25
3	HIPÓTESE E OBJETIVOS	27
3.1	Hipótese	27
3.2	Objetivo Geral	27
3.3	Objetivos Específicos	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Aquisição de Dados	28
4.2	Dados de Maré	32
4.3	Estrutura Termohalina e Oxigênio Dissolvido	33
4.4	Índices Termohalinos	34
4.5	Material Particulado em Suspensão	35
4.6	Caracterização do Campo de Correntes	36
4.7	Cálculos dos Valores Médios no Espaço e no Tempo	37
4.8	Número de Richardson por Camada (RiL)	38
4.9	Sedimentos de fundo	39
4.9.1	Granulometria	39
4.9.2	Diagrama de Pejrup	40
4.10	Composição evolutiva	41
4.10.1	Variação das profundidades	41
4.10.2	Volumes despejados	43
4.10.3	Taxa de Deposição ou Erosão de Material ($\delta\theta$)	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	Campanha Hidrográfica na estação de chuva	46
5.2	Campanha Hidrográfica na estação de seca	48

5.3	Número de Richardson por Camada (RiL)	51
5.4	Sedimentos de fundo	52
5.4.1	Granulometria e Seleção dos Grãos	52
5.4.2	Diagrama de Pejrup	55
5.5	Composição Evolutiva	56
5.5.1	Variação das profundidades	56
5.5.2	Volumes despejados	58
5.5.3	Taxa de deposição ou erosão de material ($\Delta\theta$)	60
6	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

A costa brasileira, que possui cerca de 8.000 km de extensão, abriga mais de 110 milhões de pessoas a uma distância máxima de 150 km do litoral segundo dados do Censo Demográfico 2022, o que representa 54,8% do total da população do país. Esse vasto litoral, sua posição geográfica e boas condições climáticas favorecem o transporte marítimo e conferem ao Brasil relevância geopolítica e econômica no cenário mundial (Abdala, 2024). As operações portuárias estão intimamente ligadas ao desenvolvimento econômico do país, pois a movimentação de cargas nos portos do Brasil somou mais de 1,3 bilhão de toneladas em 2023, representando um crescimento de 6,9% sobre o ano de 2022 (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO – ANTAQ, 2024).

Inserido na costa do Brasil, a Margem Equatorial Brasileira, que se estende do estado do Rio Grande do Norte ao estado do Amapá, possui 26 instalações portuárias com posições estratégicas para a economia nacional devido à sua proximidade com o Canal do Panamá e os mercados europeus e da América do Norte, o que reduz os custos transporte até esses centros comerciais e confere vantagens ao transporte marítimo a partir da região (ANTAQ, 2024).

Os benefícios econômicos dos empreendimentos portuários contrastam com os impactos inerentes à atividade portuária, pois as alterações na configuração de uso do solo no entorno das instalações alteram, dentre outros, o fluxo natural de nutrientes e sedimentos, uma vez que esses possuem papel relevante na manutenção da funcionalidade desses sistemas (Wang; Pinardi, 2002). Segundo Morin e Morse (1999), o transporte de sedimentos de fundo após sua ressuspensão pelas correntes pode influenciar na produtividade dos estuários, pois os nutrientes enriquecem a coluna de água, porém diminuem a disponibilidade de luz e os níveis de oxigênio dissolvido. Muitos desses impactos estão ligados às atividades de dragagem para a implantação das instalações portuárias ou manutenção das profundidades operacionais dos portos.

Destacam-se que as operações portuárias são diretamente impactadas pelas atividades de dragagem, já que os grandes armadores mundiais vêm aumentando o porte dos navios, o que demanda portos mais profundos. Assim, pode-se deduzir que as dragagens contribuem para o desenvolvimento econômico do país. No entanto, cada projeto de dragagem requer o entendimento dos processos de transporte de materiais em suspensão e sedimentos (Liu, Hsu; Kuo, 2002). Segundo a Associação Internacional de Companhias de Dragagem (IADC), visando à redução dos custos das dragagens portuárias, os descartes dos materiais ocorrem, em sua maioria, dentro do próprio sistema estuarino, reduzindo a possibilidade de o material ser levado pelas correntes para o oceano. Logo, os locais de descarte dos materiais dragados devem

obedecer a aspectos de conservação e manutenção do ecossistema bem como a critérios hidromorfológicos.

Cabe apontar que as atividades de dragagem alteram o meio não só da região de onde são retirados materiais como também da região onde esses são despejados. As dragagens de aprofundamento geram maiores impactos em comparação com as dragagens de manutenção, pois são retirados grandes volumes de material em curto espaço de tempo para atingir a cota estabelecida em projeto. Já nas dragagens de manutenção, são retirados menores volumes de materiais sedimentados numa cota acima da cota operacional da região.

Inserido na Margem Equatorial Brasileira e dentro do litoral do estado do Maranhão (MA), está localizado o Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), conhecido como Baía de São Marcos (BSM), que tem à leste a Ilha de São Luís e o Complexo Portuário de São Luís (CPSL), maior complexo portuário do Brasil, com o Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM), o Porto do Itaqui e o Terminal da Alumar. Juntos, os três portos importaram ou exportaram aproximadamente 216 milhões de toneladas em 2023, o que corresponde a 17% do total de carga movimentada no país, o que confirma o CPSL como o maior movimentador de cargas do Brasil (Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, 2016; ANTAQ, 2024).

Para a continuidade das operações portuárias, as empresas administradoras dos portos que compõem o CPSL realizam, periodicamente, dragagens para a manutenção das profundidades operacionais. O TMPM, maior terminal portuário do Brasil em carga movimentada, tem profundidades que atingem 25 m. Já o Porto do Itaqui, maior porto público dentre as regiões Norte e Nordeste, é o porto público mais profundo do Brasil, com profundidade na área de atracação até 19 m (ANTAQ, 2024; Brasil, 2020). Os materiais dragados pelos citados portos são lançados na Área de Despejo do CESM, localizada no interior da Área de Fundeio nº 8, homologada pela Autoridade Marítima destinada a fundear navios com até 11 m de calado (Brasil, 2020).

Baseando-se nas análises de salinidade, material particulado em suspensão (MPS) e temperatura, pode-se afirmar que no CESM e, conseqüentemente, no complexo portuário e na Área de Despejo, as águas são influenciadas pelos fluxos fluviais oriundos principalmente da bacia do Rio Mearim, em especial durante e após o período de chuvas, pois os índices de monitoramento desses fatores apresentaram grande variação entre os diferentes períodos amostrais analisados nas pesquisas de Santos, V. S. (2018) e Lima (2019). No entanto, devido aos perfis bidirecionais do escoamento das correntes do CESM, com as correntes de vazante levemente maiores fica evidente que a maré possui ampla influência na circulação hidrodinâmica em toda a região (Lima, 2019).

As áreas de despejo são impactadas no momento em que recebem materiais oriundos das dragagens, o que não ocorreria de forma natural. Tais impactos podem inviabilizar a utilização de uma área de despejo, visto que os materiais depositados na região contribuem para a redução da profundidade do local. Destaca-se que a deposição não natural de grande volume de material numa área pode acarretar ainda inúmeros impactos à biota presente na região.

Para a compreensão dos processos de transporte de sedimentos é preciso o entendimento da hidrodinâmica da região estuarina e dos atores que aportam sedimentos no local, sejam eles naturais ou antrópicos. Cabe saber sobre o fluxo de materiais continente-oceano, bem como a determinação da origem e do destino dos sedimentos, além dos nutrientes e poluentes neles contidos. Segundo Andutta, Wang, Li e Williams (2014), os estuários denominados macromaré, como o caso do CESH, possuem mecanismos que controlam a ressuspensão e transporte de sedimentos.

De acordo com Castiglia (2006) e Monteiro (2008), o transporte para fora da área de despejo e posterior deposição do material são consequências esperadas do ponto de vista da morfologia do fundo. Contudo, o retorno do material dragado às áreas portuárias ou o canal de acesso é algo que deve ser evitado, uma vez que isso reduz a profundidade e aumento da frequência de dragagens de manutenção. Assim, a compreensão precisa da dinâmica morfológica e o conhecimento de suas relações com os parâmetros de qualidade da água que são, por conseguinte, pressupostos científicos fundamentais para a otimização das dragagens portuárias.

O lançamento contínuo de material oriundo das atividades de dragagem pode gerar um assoreamento na Área de Despejo, o que reduz a profundidade no local e compromete a utilização da Área de Fundeio nº 8, chegando ao ápice de reduzir a segurança da navegação, visto que embarcações de grande porte que trafegam pela região podem fundear no local para aguardar o momento de atracar nos portos da região.

Considerando que as operações portuárias demandam atividades de dragagens e, conseqüentemente, descarte do material dragado em local seguro e com menores impactos ambientais, o estudo do assoreamento da Área de Despejo no CESH é necessário para que sejam mantidas as atividades portuárias e o tráfego de embarcações de forma segura.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela necessidade de estudar os reais impactos causados na Área de Despejo do CESH pela redução da profundidade com o assoreamento ocasionado pela deposição de material oriundo de dragagens da região. Outro fator que corrobora a premência de pesquisas na região é a localização da Área de Despejo a ser estudada

dentro de uma Área de Fundeio para navios, o que pode comprometer a segurança da navegação.

A necessidade de manutenção e até mesmo de ampliação das operações portuárias, como previsto pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) em seu Plano de Desenvolvimento e Zoneamento (PDZ) (EMAP, 2019), com o intuito de atender às demandas econômicas, requer o estudo do assoreamento da Área de Despejo de forma a manter as atividades de dragagem para continuidade da atracações de navios, mas também para manter o equilíbrio ambiental da região.

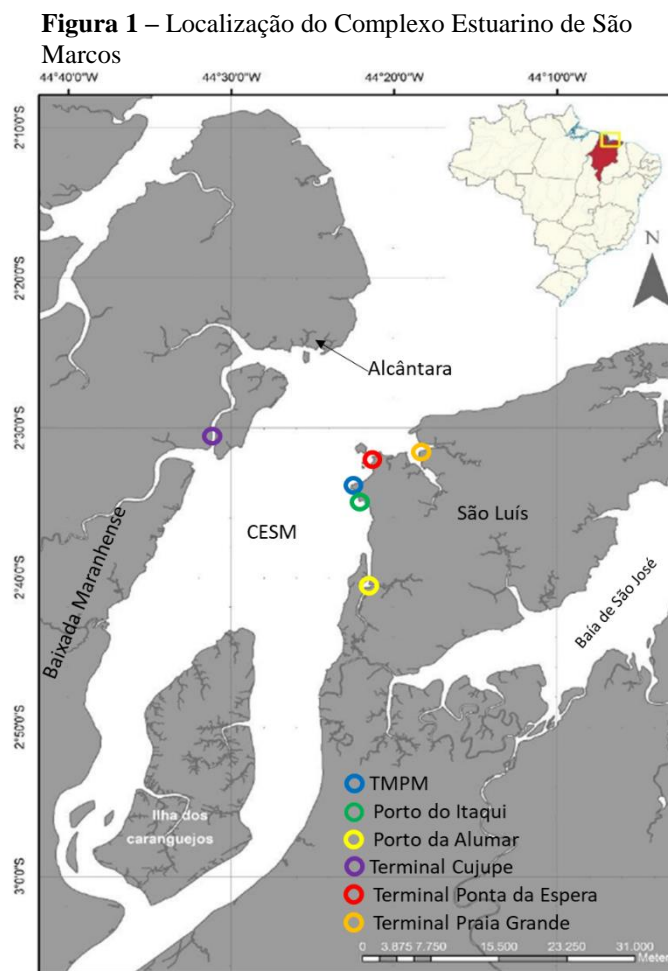
Considerando a importância econômica do CPSL para toda a região de influência, a necessidade de dragagens em seus portos e os impactos que podem ser aplicados à Área de Fundeio nº 8, com o risco de redução das profundidades, o estudo da capacidade de suporte operacional da Área de Despejo se torna imprescindível para continuidade de sua utilização e a continuidade das operações portuárias com eficiência.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização

2.1.1. Complexo Estuarino de São Marcos

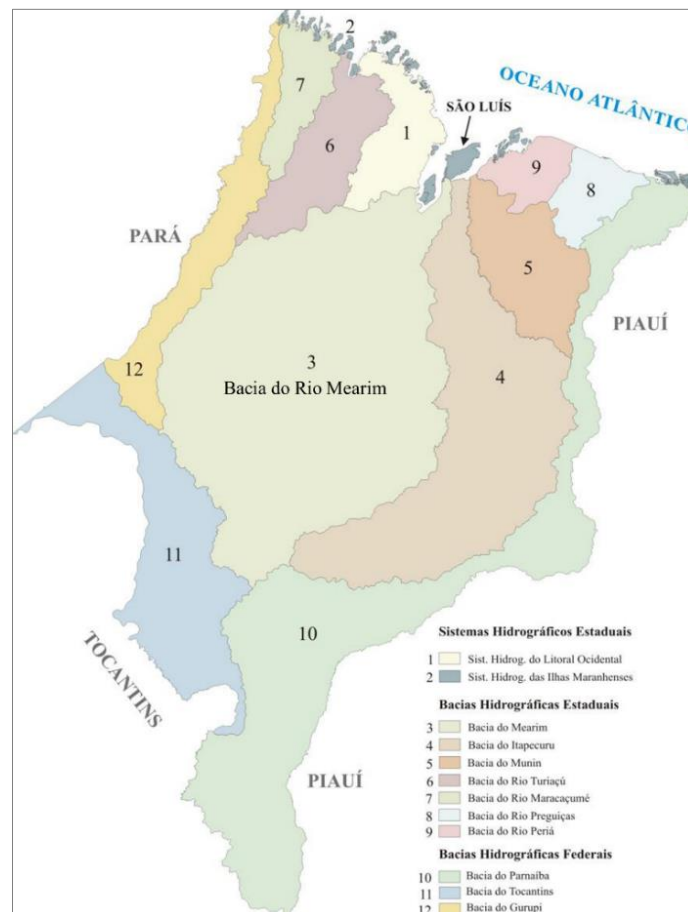
O Complexo Estuarino de São Marcos, conhecido como Baía de São Marcos, está localizado na Margem Equatorial Brasileira, a oeste da Ilha de São Luís – MA (Figura 1) e possui direção Nordeste – Sudoeste, com cerca de 64 km de extensão e largura aproximada de 55 km em sua porção mais aberta, reduzindo para 13 km altura da região portuária, aumentando novamente para 25 km de largura ao norte da Ilha dos Caranguejos e afunilando para 2 km ao sul da citada ilha. A oeste do CESM está localizada a Baixada Maranhense, região de grandes reentrâncias com vastas planícies alagadas e grande área de manguezais. Na margem leste do CESM também são observadas, principalmente em maré baixa, praias e falésias (UEMA, 2016).



Em um estudo precursor para caracterizar de forma físicogeomorfológica o CESM, Moraes (1977) demonstrou o comportamento bidirecional das correntes na região e uma diluição da salinidade da água marinha pelas águas oriundas da drenagem continental, ocorrência comum em estuários bem misturados. O pesquisador apresentou também valores elevados de corrente no canal principal do complexo próximo à Ilha do Medo.

A diluição das águas oceânicas que adentram o CESM ocorre pelo desague da Bacia do Mearim (Figura 2), situada ao sul desse ambiente. Essa é a maior bacia do estado do Maranhão, com cerca de 99 mil km², 30% da área do estado, abrangendo 89 municípios, com descargas máximas ocorrendo entre março e maio, a estação chuvosa da região, e recebendo como principais contribuições os rios Mearim, Pindaré e Grajaú (UEMA, 2016).

Figura 2 – Mapa das Bacias e Sistemas Hidrográficos do Maranhão

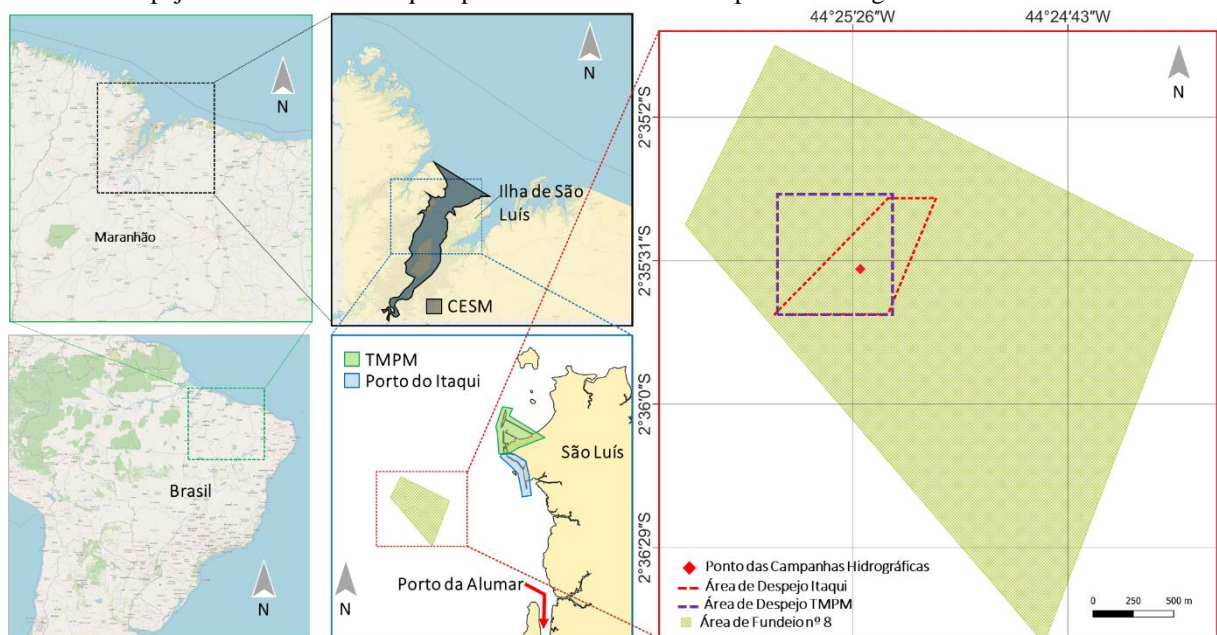


Fonte: UEMA, 2016.

2.1.2. Complexo Portuário de São Luís

O CESH é navegável em sua maior parte, pois apresenta profundidade média de 10 m e áreas que atingem 50 m. Essa boa condição de navegação, associada à relativa proximidade do Canal do Panamá, Europa e América do Norte, favorece a utilização da sua costa como região portuária (EMAP, 2019). Por essas características foram implantados na cidade de São Luís três instalações portuárias de grande porte: o Porto do Itaqui, o Terminal Marítimo Ponta da Madeira e o Terminal da Alumar. Essas instalações compõem o Complexo Portuário de São Luís (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), composto ainda pelo terminal de passageiros da Praia Grande e os terminais de *ferryboats* da Ponta da Espera e do Cujupe, que fazem a travessia de veículos e de passageiros do CESH entre as cidades de São Luís e Alcântara.

Figura 3 – Localização do CESH, Ilha de São Luís, TPM, Porto do Itaqui, Porto da Alumar, Área de Fundeio, Áreas de Despejo do TPM e do Itaqui e ponto de fundeio das campanhas hidrográficas



Fonte: Elaborado pelo autor.

O CPSL possui relevante importância econômica não só para o estado do Maranhão como para todo o Brasil, uma vez que juntos movimentaram 216 milhões toneladas de cargas em 2023, o que corresponde a 16,5% do total de carga movimentada nos portos do país, com um total de 1971 navios, o que equivale a 2,6% dos navios que atracaram nos portos brasileiros, segundo o Estatístico Aquaviário da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2024).

O TMPM da empresa Vale S. A., localizado ao sul da Ilha do Medo, é o maior porto do Brasil em quantidade de carga movimentada, com mais 166,3 milhões toneladas embarcadas e/ou desembarcadas em 2023, o que corresponde a 12,7% de toda a movimentação dos portos do Brasil, com 656 navios atracados (ANTAQ, 2024). Especializado em embarque de minério de ferro e ferro gusa, o TMPM possui cinco áreas de atracação conhecidas como berços, com profundidade que alcança 25 m e capacidade de atracar os maiores navios de carga a granel em operação no país (Brasil, 2020; Vale, 2021).

O Porto do Itaqui, administrado pela Empresa Maranhense de Administração Portuária, recebeu em 2023 1026 navios que movimentaram mais de 36,3 milhões de toneladas de cargas (diversos produtos, como soja, derivados de petróleo, milho, fertilizantes, celulose paletizada, carga geral, dentre outros), tornando-se o quarto maior porto público do país (ANTAQ, 2024). O Itaqui possui nove berços com profundidades que variam de 12,0 m a 19,0 m (Brasil, 2020).

Já o Terminal Portuário da empresa Alumar é composto por dois berços de atracação com profundidade de 13 m operando principalmente bauxita e outros insumos da cadeia produtiva de alumínio com 13,4 milhões de toneladas movimentadas em 2023 e atracação de 319 navios (Brasil, 2020; ANTAQ 2024).

A profundidade de diversos pontos do CESM pode ser reduzida pela ação natural de deposição de sedimentos transportados pelas correntes marítimas que decantam nos pontos de menor energia, processo comum a qualquer estuário (Suguio, 1980). Assim, os portos do CPSL podem sofrer com o assoreamento e perder profundidade nas suas áreas. Para recuperar tal profundidade após o processo de assoreamento, os portos realizam dragagens de manutenção, o “ato de retirada de material e sedimentos do leito dos corpos d’água [...] para restabelecer total ou parcialmente as condições originalmente licenciadas” para que a região retorne à condição propícia de operação (Brasil, 2023). As dragagens consistem em atividades de engenharia para a implantação e manutenção, por meios artificiais, das profundidades necessárias para a utilização dos portos e vias navegáveis de maneira segura (Brasil, 2017).

Para manutenção das profundidades das áreas de atracação, o TMPM mantém contrato de dragagem permanente com uso de draga do tipo autotransportadora (draga *hopper*) com capacidade para dragar até 177.000 m³ por mês (Figueiredo, 2018). Após solicitação fundamentada na Lei nº 12.527 (Brasil, 2011), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) disponibilizou os Relatórios de Monitoramento Ambiental do TMPM do período de 2018 a 2023, os quais informam que o terminal realiza dragagens constantes, com a retirada média 1,19 milhão m³ por ano de material.

O Porto do Itaqui também possui contrato de dragagem de manutenção das profundidades dos seus berços com média de 13 mil m³ por ano entre 2015 e 2023 utilizando draga *hopper*. Visando ao aumento da movimentação portuária no Itaqui, a EMAP executou um projeto de dragagem de grande porte em 2022 com o “aprofundamento do leito marinho nas áreas ao Norte, ao Leste [e] ao Sul da Ilha de Guarapir”, localizada a 300 m a oeste do Porto do Itaqui. Segundo o relatório de gerenciamento da dragagem, foram retirados 312 mil m³ de material num período de 16 dias, o que corresponde a mais de 19 mil m³ diários. Após a dragagem de aprofundamento, a dragagem de manutenção em 2023 retirou 67 mil m³ de material das áreas de atracção e da área de navegação ao norte da ilha de Guarapir.

No decorrer do processo de dragagem, o material é descartado na área de Despejo, conhecida como “bota-fora”, área devidamente licenciada pelas autoridades ambiental e marítima para recepcionar o material (Brasil, 2023). No CESM, as áreas de despejo do TMPM e do Porto do Itaqui (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) estão localizadas acerca de 7 km dos portos, possuindo 358.366 m² e 507.600 m², respectivamente, com uma área de sobreposição de 264.491 m².

Já o Porto da Alumar utiliza um processo hidráulico para retirada dos sedimentos das áreas dos berços e canal de acesso com o uso de draga de injeção de água tipo WAD (*water injection dredger*). Essa metodologia de dragagem gera uma turbulência no fundo marinho revolvendo o material depositado, fazendo com que ele seja transportado pelas correntes locais, o que pode aumentar o Material Particulado em Suspensão transportado no CESM.

Tabela 1 – Vrtices dos polígonos da área de Fundeio n 8, área de Despejo do Itaqui e área de Despejo do TMPM (Datam WGS84).

Vrtices do polígono da área de Fundeio n8.		Vrtices do polígono da área de Despejo do Itaqui		Vrtices do polígono da área de Despejo do TMPM	
235,4’S	4426,0’W	235’41,94’’S	4425’19,33’’W	235’18,39’’S	4425’41,34’’W
234,8’S	4425,7’W	235’18,69’’S	4425’19,28’’W	235’18,38’’S	4425’18,51’’W
235,5’S	4424,3’W	235’18,63’’S	4425’09,65’’W	235’41,83’’S	4425’18,50’’W
236,8’S	4424,8’W	235’42,01’’S	4425’42,08’’W	235’41,83’’S	4425’41,34’’W

Fonte: Elaborado pelo autor.

A contribuição fluvial da Bacia do Mearim influencia não são o CESM, mas também pode afetar a área de Fundeio e a área de Despejo do CPSL, especialmente durante e após o período de chuvas, uma vez que aumentam os volumes e, conseqüentemente, o aporte de sedimentos carreados pelos corpos hídricos que alimentam a bacia (Santos, V. S., 2018; Lima, 2019).

Nota-se que a Área de Despejo do CPSL está localizada no interior da Área de Fundeio nº 8 do CESH, utilizada mediante autorização da Capitania dos Portos do Maranhão para fundear navios que possuem até 11 m de calado, ou seja, sua fração submersa (Brasil, 2020). Cabe salientar que o descarte numa área de despejo situada no centro de um fundeadouro pode ocasionar a redução de profundidade pelo eventual aprisionamento do material em seu interior. Após consultar 11 autoridades portuárias do Brasil sediadas nos estados do Pará, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul por meio dos dispositivos da Lei nº 12.527, de 2011, foi informado que as áreas de despejo dos portos sob suas respectivas jurisdições não estão inseridas em Áreas de Fundeio.

Considerando que as operações portuárias demandam atividades de dragagens e, conseqüentemente, descarte do material em local seguro e com menores impactos ambientais, o estudo do assoreamento da Área de Despejo no CESH é necessário para que sejam mantidas as atividades portuárias e o tráfego de embarcações de forma segura.

No entanto, as dragagens portuárias alteram o meio não só da região de onde são retirados materiais como também da área em que são despejados. Nas dragagens de aprofundamento, como a executada em 2022 no Itaqui, são retirados grandes volumes de material em curto espaço de tempo para o alcance da cota estabelecida em projeto, mas com remotas ocorrências, enquanto nas dragagens de manutenção ocorrem com frequência maior e são retirados menores volumes de material sedimentar. Contudo, ambos os tipos de dragagem possuem potencial de impacto negativo ao meio ambiente como a redução do oxigênio na água, grande pluma de sedimentos, retirada de camada rica em nutrientes, alteração das correntes e soterramento da fauna bentônica (Alfredini; Arasaki, 2018).

2.2. Aspectos Climatológicos

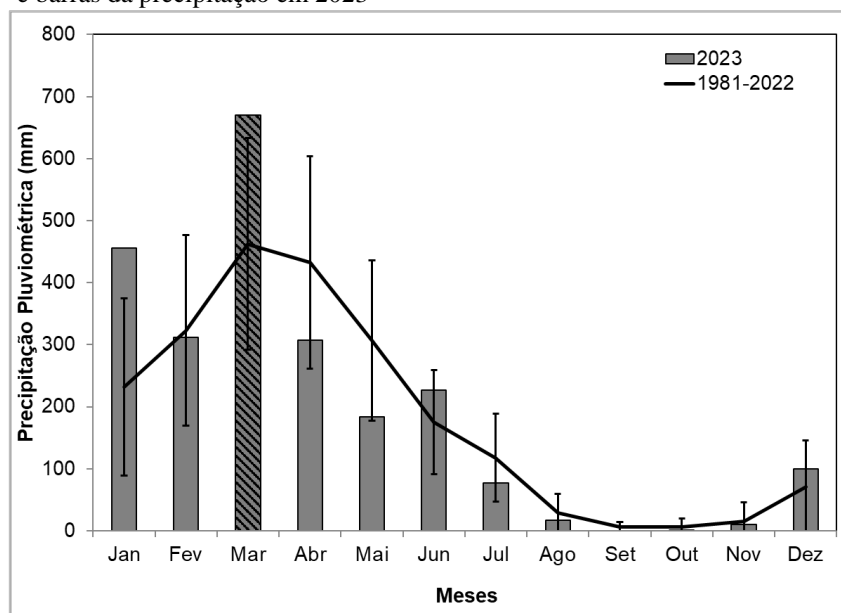
Por estar próximo ao Equador, o Maranhão possui elevadas temperaturas todo o ano. O estado está numa transição climática, pois sua região leste possui clima semiárido, quente e seco, comum a quase todo o nordeste brasileiro. A região oeste do estado possui clima equatorial, quente e úmido, comum à Região Amazônica. Ademais, por estar próximo ao Oceano Atlântico e ao Planalto Central Brasileiro, o Maranhão possui diferentes regimes de chuva (UEMA, 2016).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema meteorológico regulador da chuva do litoral maranhense e de toda costa equatorial brasileira (El-Robrini *et al.*,

2011). O período chuvoso ocorre no primeiro semestre, quando a ZCIT está ao sul do Equador, condicionando ventos de nordeste (NE) na região e muita umidade trazida dos oceanos para o continente, propiciando elevada pluviosidade (Figueira; Nobre, 1990). O clima da região do CISM é tropical chuvoso com elevadas temperaturas e duas estações climáticas bem distintas: uma chuvosa (balanço hídrico positivo), com início em janeiro e término em junho, e uma seca (balanço hídrico negativo), que se estende de julho a dezembro (Alvares; Stape; Sentelhas; Gonçalves; Sparovek, 2013; Samaritano; Bernardino; Siegle; Tessler; Uemura, 2013).

A média anual de precipitação pluviométrica entre 1981 e 2022 é de 2175 mm na estação 82280 localizada em São Luís, MA, com valores anuais oscilando entre 884 e 3981 mm. No período chuvoso a média mensal é de 322 mm com os registros máximos observados nos meses de fevereiro, março e abril, enquanto no período seco a média mensal é de 41 mm, com os menores registros de pluviosidade ocorrendo em setembro e novembro (Figura 4).

Figura 4 – Média histórica de pluviosidade de 1981 a 2022 (linha) com desvio e barras da precipitação em 2023



Fonte: Elaborado pelo autor.

A temperatura média do ar na região é de 27,8 °C e as médias das temperaturas máximas e mínimas são de 31,2 °C e 23,9 °C, respectivamente. Durante o período amostral, a pluviosidade acumulada para o mês de março foi de 670 mm, o que representa 45% acima da média histórica para o mês; enquanto em setembro o índice registrado foi zero.

2.3. Características Hidrodinâmicas

No CESM a maré possui regime semidiurno com duas marés baixas e duas marés altas por dia lunar e variação até 7,1 metros, o que o caracteriza como um ambiente de macromaré. Com essa elevada variação, a maré é o principal ente controlador da hidrodinâmica da região, pois tal alternância gera elevadas correntes, atingindo $2,75 \text{ ms}^{-1}$ observadas no canal de acesso ao CPSL, paralelamente à costa, ou seja, para nordeste na vazante e sudoeste na enchente (Moraes, 1977; Pereira; Harari, 1995; Samaritano; Bernardino; Siegle; Tessler; Uemura, 2013).

A hidrodinâmica da região é predominantemente controlada pelas variações da maré de regime semidiurno (duas marés altas e duas marés baixas por dia lunar), com intervalos de 6,2 horas entre estofas consecutiva, e alturas máximas de, aproximadamente, 7 metros, caracterizando o CESM com um ambiente de macromaré. Intensas correntes, que atingem velocidades máximas de até $2,75 \text{ m s}^{-1}$, são observadas no CESM, sendo as maiores intensidades observadas no canal de acesso à região portuária. As correntes na região apresentam assimetria das intensidades entre maré de enchente e vazante, onde geralmente, as correntes se mantêm praticamente normais à costa, nos sentidos nordeste na vazante e sudoestes na enchente (Moraes, 1977; Pereira; Harari, 1995; Samaritano; Bernardino; Siegle; Tessler; Uemura, 2013).

Santos, V. S. (2018), Lima (2019) e Carvalho (2023), em estudos no CESM, obtiveram resultados indicando homogeneidade vertical das águas locais. Santos, V. S. (2018), em pesquisa com quatro campanhas utilizando correntometrias radiais, identificou velocidades de até $3,35 \text{ m s}^{-1}$ em correntes em maré vazante em seções próximas ao Porto do Itaqui e ao TMPM. Lima (2019) realizou três campanhas hidrográficas com seis fundeios em dois pontos distintos do complexo e identificou correntes de até $1,4 \text{ ms}^{-1}$ com balanço hídrico positivo, ou seja, em sentido de vazante com isopicnais e isohalinas próximas da verticalidade. Os dois estudos identificaram valores de material particulado em suspensão de 852 mg L^{-1} e 1.100 mg L^{-1} no fundo, respectivamente, sugerindo remobilização do material.

3. HIPÓTESE E OBJETIVOS

3.1. Hipótese

O aumento da frequência das dragagens tem provocado o assoreamento da Área de Despejo devido à falta de competência das correntes estuarinas em transportar o material ao oceano costeiro adjacente.

3.2. Objetivo Geral

Determinar a capacidade de suporte operacional e a taxa de assoreamento, pela deposição de material dragado, da Área de Despejo do CESM.

3.3. Objetivos Específicos

- a) Caracterizar a hidrodinâmica na Área de Despejo;
- b) Avaliar granulometria do sedimento na Área de Despejo;
- c) Caracterizar o material em suspensão na Área de Despejo;
- d) Avaliar a variação da morfologia do assoalho na Área de Despejo;
- e) Avaliar o transporte de sedimentos na região da Área de Despejo; e
- f) Determinar a taxa de assoreamento da Área de Despejo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Coleta de Dados

Para caracterização hidrográfica da Área de Despejo do CESM foram realizadas duas campanhas hidrográficas para aquisição de dados correntográficos, variáveis de estado (condutividade, temperatura e salinidade), amostras de água para a determinação do MPS e sedimentos de fundo. O período amostral está descrito na Tabela 2. As campanhas foram realizadas com recursos financeiros do projeto “Modelagem Matemática da Capacidade de Carga Sedimentar do Polígono de Disposição Estuarino (PDE) do Complexo Portuário de São Luís Frente ao Aumento da Atividade de Dragagem” da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) sob coordenação do professor Dr. Audálio Rebelo Torres Junior, diretor do Instituto Ciências do Mar (ICMar) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Tabela 2 – Períodos amostrais

Fundeio	Período	Início	Fim	Coordenadas
F-1	Chuvoso	9 h 46 21 mar. 2023	10 h 24 mar. 2023	Lat. 2° 35' 33,68" S Long. 44° 25' 17,47" W
F-2	Seco	8h 50 14 ago. 2023	9 h 17 ago. 2023	

Fonte: Elaborado pelo autor.

As campanhas foram realizadas em períodos de sizígia do CESM, quando Lima, Dias, Teixeira, Godoi, Torres Júnior e Araújo (2021) e Santos, V. S. (2018) afirmam que há uma baixa estratificação das camadas de água, pois o Complexo é caracterizado como estuário bem misturado.

Para a caracterização da região utilizou-se a embarcação Guilherme IV, que permaneceu fundeada em torno das coordenadas informadas na Tabela 2, nas quais foi lançada a âncora que estabilizou a embarcação em um raio de cerca de 100 m. O ponto de fundeio está inserido no polígono da Área de Despejo, essa inserida na Área de Fundeio nº 8 do CESM.

Em cada uma das campanhas a embarcação permaneceu fundeada por 72 horas, período em que foram coletadas, a cada hora, duas amostras de água da camada inferior e duas amostras da camada superficial, resultando 576 amostras de 0,25 L cada para a determinação de material particulado em suspensão. As amostras foram coletadas com uso de uma garrafa de *Van Dorn* a 0,5 m da lâmina d'água para as amostras de superfícies e a 1 m do fundo para as amostras das camadas inferiores da água. As amostras foram armazenadas em frascos de polietileno

identificados com o nome da campanha, data, hora, número da amostra e ponto da coleta (Figura 5).

Figura 5 – Amostras de água da coleta C-28, do dia 15/09/2023, às 12 h de superfície e fundo para determinação de MPS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi utilizado um *Conductive-Temperature-Depth* (CTD) modelo EXO2 (YSI, Ohio, Estados Unidos da América) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) para a aquisição de dados de temperatura, pressão (convertida em profundidade), condutividade (convertida em salinidade) e oxigênio dissolvido. O instrumento foi protegido por uma grade metálica e lançado a cada hora durante as 72 horas de cada campanha. O lançamento ocorreu de forma manual, com o instrumento descido preso a uma corda de $\phi 12$ mm e comprimento de 50 m numa velocidade aproximada de $0,5 \text{ ms}^{-1}$ até tocar o fundo ou a corda ser tracionada pelo fluxo de água.

Figura 6 – Lançamento do CTD para coleta de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

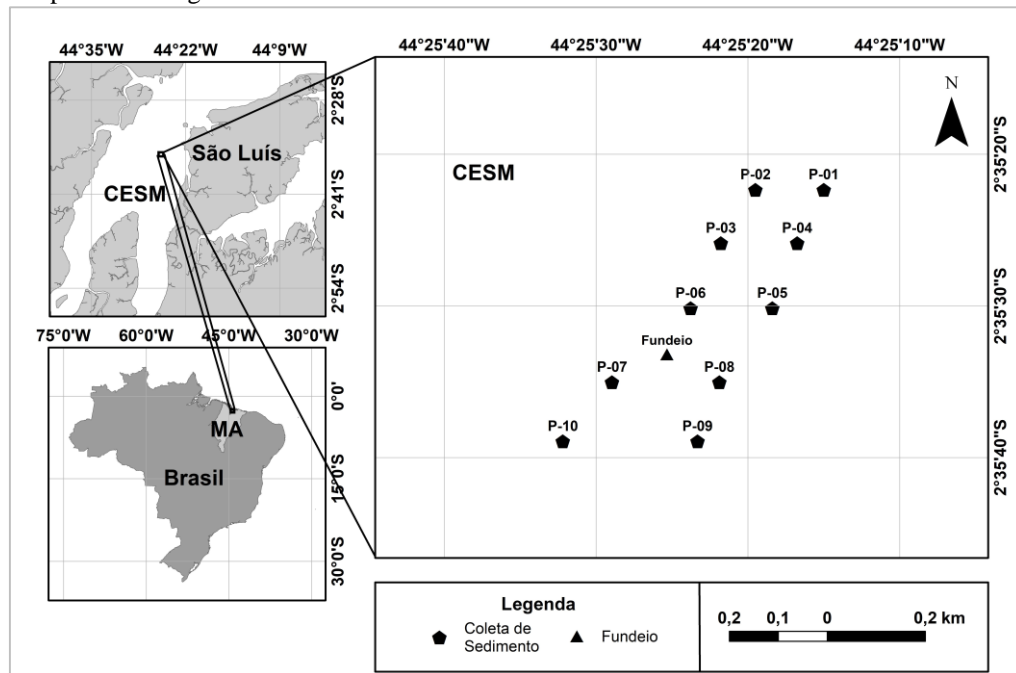
O CTD foi regulado para aquisição de dados na frequência de 1 Hz. A resolução do sensor de condutividade foi de $0,1 \mu\text{S cm}^{-1}$ com amplitude de 0 a 200 mS cm^{-1} , a temperatura foi medida em uma resolução de $0,0001 \text{ }^\circ\text{C}$, com amplitude de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a pressão foi medida em uma acuidade de 0,001 psi e o oxigênio dissolvido foi medido numa resolução de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$. Os sensores foram previamente calibrados no laboratório do ICMar utilizando amostras padrão. Após cada lançamento do equipamento, ele era armazenado em água doce em temperatura ambiente para preservar os ajustes dos sensores previamente calibrados.

Apenas os dados colhidos na descida do CTD foram aproveitados, pois o procedimento de subida do aparelho é considerado mais turbulento, gerando perturbações na estratificação real da massa de água. O equipamento armazenou em sua memória interna os dados coletados durante as campanhas, que foram retirados apenas no laboratório do ICMar e passaram por um controle de qualidade inicial com o intuito de eliminar os dados inconsistentes provenientes de erros sistemáticos e aleatórios. As lacunas foram preenchidas por meio do uso de uma interpolação linear em que apenas os perfis que obtiveram níveis de interpolação menores a 5% foram considerados na análise.

Para medir a velocidade da corrente de água foi utilizado um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) modelo *Sontek* da marca *YSI* (California, Estados Unidos da América) com frequência de 500 Hz acoplado a um sistema de *bottom tracking* na direção transversal ao escoamento com resolução de $0,0001 \text{ ms}^{-1}$. O equipamento foi fixado numa haste presa à embarcação a 0,5 m abaixo da linha da água e programado para realizar a aquisição de dados a cada 120 segundos com células de 0,5 m cada.

Após 72 h de cada fundeio foram coletadas dez amostras de sedimentos de fundo na Área de Despejo. Os pontos de coletas estão localizados dentro da Área de Despejo, são apresentados na Figura 7 e especificados na Tabela 3.

Figura 7 – Localização dos 10 pontos de coleta de sedimentos e do ponto de fundeio das campanhas hidrográficas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Pontos de coleta de sedimentos

Ponto	Coordenadas Geográficas	
1	2° 35' 22,34" S	44° 25' 14,99" W
2	2° 35' 22,34" S	44° 25' 19,49" W
3	2° 35' 25,86" S	44° 25' 21,77" W
4	2° 35' 25,86" S	44° 25' 16,74" W
5	2° 35' 30,15" S	44° 25' 18,38" W
6	2° 35' 30,15" S	44° 25' 23,77" W
7	2° 35' 35,03" S	44° 25' 28,95" W
8	2° 35' 35,03" S	44° 25' 21,87" W
9	2° 35' 38,93" S	44° 25' 23,31" W
10	2° 35' 38,93" S	44° 25' 32,19" W

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a coleta de sedimento foi utilizado um amostrador do tipo *Gibbs* de aço inox com massa de 25 kg. Ao corpo do equipamento foi fixado um filtro de tecido de algodão (Figura 8). As amostras, com cerca de 1,0 kg cada, foram armazenadas em sacos plásticos e identificadas com o número do ponto e data de coleta.

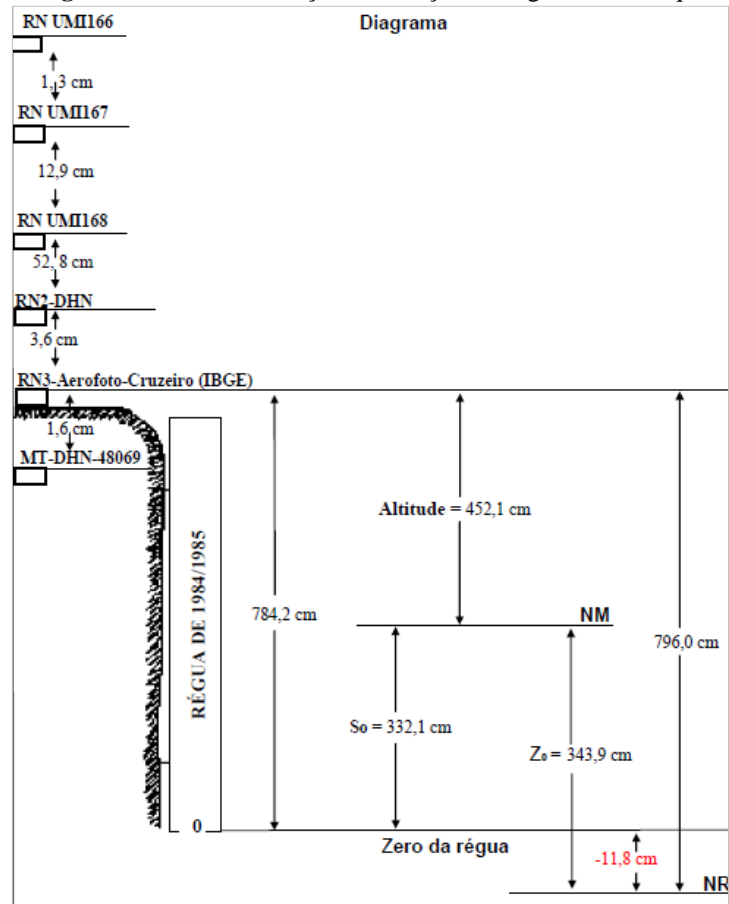
Figura 8 – Amostrador tipo *Gibbis*



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Dados de Maré

Os dados de maré do CESM foram obtidos junto à Empresa Maranhense de Administração Portuária, que possui um marégrafo instalado no Porto do Itaqui. O marégrafo é da marca *Valeport* modelo *TideMaster VRS-20*, do tipo “sensor de radar” com o registro do nível a cada 5 minutos, com duração de leitura de 30 segundos, alcance mínimo de 0,8 m e máximo de 20 m e precisão 0,001 m. O equipamento está instalado no Berço 106 do Porto do Itaqui, na posição Latitude: 2°34’20,32” S e Longitude: 44°22’26,76” W. Os dados foram fornecidos pela EMAP após solicitação baseada na Lei de Acesso à Informação (Brasil, 2011), por meio da Ficha de Redução da Estação Maregráfica do Itaqui (Figura 9). Destaca-se que o nível NR (nível de redução) da estação maregráfica foi adotado como nível “zero” da pesquisa.

Figura 9 – Ficha de redução da Estação Maregráfica do Itaquí

Fonte: EMAP

4.3. Estrutura Termohalina e Oxigênio Dissolvido

Durante a etapa de pré-processamento os dados espúrios foram detectados e eliminados por meio do uso de uma taxa de máxima de variação de cada propriedade, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de filtro para dados espúrios

Grandeza	Unidade de Medida	Valor Mínimo	Valor Máximo
Temperatura	°C	15	40
Salinidade	g kg ⁻¹	0	40
Oxigênio Dissolvido	mgL ⁻¹	1	1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

A velocidade média de descida do CTD de 0,5 m s⁻¹ e a frequência de aquisição de dados de 01 Hz permitiu a captação de dois dados das grandezas mensuradas por metro da coluna de água. No entanto, devido ao movimento da embarcação, à corrente e ao lançamento manual do equipamento, não foi possível garantir um espaçamento vertical constante dos dados. Para

superar o problema foi calculada a média correspondente ao tamanho da janela aplicada, sendo utilizada uma janela de 1 m para os pontos amostrais. A filtragem por janela móvel empregada é a do tipo *Hanning*, que promove uma distribuição de pesos de caráter gaussiano, privilegiando a medida central.

Após o pré-processamento os dados foram divididos em blocos de 1 m de espessura da superfície ao fundo. Em cada bloco, os dados que diferem da média ± 3 vezes o desvio padrão do bloco foram eliminados (Thomson; Emery, 2014).

A fim de minimizar a variação da profundidade da coluna de água nos perfis nos ciclos de maré (8,9 m a 17,2 m), a profundidade de amostragem (z) foi normalizada pelo seu valor adimensional (equação 1), segundo metodologia de Kjerfve (1975).

$$Z = \frac{z}{h(t)} \quad (1)$$

Onde Z é a profundidade normalizada e $h(t)$ é a profundidade da coluna de água no momento da amostragem. As variáveis de estado (Temperatura e Salinidade), oxigênio dissolvido e as componentes velocidade (u e v) foram interpoladas na coluna de água em intervalos de $\Delta Z = -0,1$, ou seja, desde a superfície ($Z = 0$) até o fundo ($Z = -1$), em regimes de marés de enchente e vazante (Bergamo; Miranda; Corrêa, 2002; Miranda; Castro; Kjerfve, 2002).

As variáveis de estado foram calculadas seguindo a metodologia de *International Thermodynamic Equation of Seawater 2010 - TEOS-10* (Intergovernmental Oceanographic Commission – IOC, 2015). A densidade convencional (σ_t) foi calculada de acordo com a equação 2, a seguir:

$$\sigma_t = \rho(S, T, P_{atm}) - 10^3 \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade da água do mar com a salinidade (S), temperatura (T) e a pressão atmosférica (P_{atm}). Neste trabalho adotou-se a unidade de medida $\mu mol kg^{-1}$ para as concentrações de oxigênio dissolvido.

4.4. Índices Termohalinos

Foi empregado o clássico Diagrama Temperatura e Salinidade espalhado, pois representa graficamente as observações de temperatura e salinidade visando à identificação de fontes de massa de água para a formação da massa de água estuarina (Miranda; Castro; Kjerfve, 2002). Para a estimativa da área horizontal e vertical de influência de um dado par TS

(Temperatura e Salinidade) foi levada em consideração a isotropia na distribuição das estações hidrográficas.

A distância vertical para cada par TS foi definida de acordo com a equação 3, a seguir:

$$d_i \begin{cases} \frac{h_{i+1}}{2} & \text{se } i = 1 \\ \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2} & \text{se } 1 < i < n \\ Z - h_i + \frac{h_i - h_{i-1}}{2} & \text{se } i = n \end{cases} \quad (3)$$

Onde o índice i representa a i -ésima observação da coluna d'água, numeradas consecutivamente a partir da superfície livre até o fundo, logo $i = 1$ é a observação mais próxima à superfície e $i = n$ é a observação mais próxima ao fundo. O termo d_i representa a distância vertical de influência da i -ésima observação na coluna d'água, $h_i > 0$ é a profundidade da i -ésima observação e Z é a profundidade do fundeio (Miranda; Castro, 1979).

4.5. Material Particulado em Suspensão

Os teores de Material Particulado em Suspensão nas amostras de água foram determinados em $mg L^{-1}$ a partir de filtração por gravimetria por meio da razão da diferença de massa pelo volume, conforme apresentada na equação 4.

$$MPS = \frac{(m_f - m_i)}{Vol} \quad (4)$$

Onde m_i e m_f são a massa do filtro antes e após o processo de filtração em mg , respectivamente, e Vol é o volume amostrado em L .

O processo de filtração utilizou filtros em fibra de vidro (Milipore AP040) de 47 mm de diâmetro e porosidade menor ou igual a $2,0 \mu m$. Inicialmente, os elementos filtrantes foram submetidos a um processo de tripla lavagem com 20 mL de água destilada. Em seguida, colocados em estufa a $60^\circ C$ por 60 minutos para secagem. Somente após esse processo as massas iniciais (m_i) dos filtros foram determinadas. Antes do processo de filtração, cada amostra de água foi homogeneizada por agitação durante 60 segundos.

A filtração foi realizada segundo a metodologia descrita por Strickland e Parsons (1972) na qual o volume amostral foi filtrado. Para tanto, foi utilizada uma bomba a vácuo com pressão de 300 mmHg a 350 mmHg. Após a filtração, os elementos filtrantes foram submetidos a nova etapa de secagem em estufa a $60^\circ C$ por 60 minutos e, então, foram determinadas as

massas finais (m_f) dos filtros por meio da balança analítica da marca Shimadzu modelo ATX224, com precisão de 0,1 mg.

4.6. Caracterização do Campo de Correntes

Para a área de estudo foi utilizado o referencial $Oxyz$, com o Oy orientado para o norte, Ox para o leste e Oz no sentido oposto à gravidade. Na decomposição do vetor velocidade de corrente em seus componentes longitudinal ao canal estuarino (*along channel*) e transversal ao canal (*cross channel*), em relação ao referencial $Oxyz$, foram empregadas as relações trigonométricas 5 e 6 a seguir.

$$u = |\vec{V}| \cdot \cos\theta \quad (5)$$

$$v = |\vec{V}| \cdot \sen\theta \quad (6)$$

Como o ADCP se orienta em relação ao Norte Magnético, o ângulo θ foi corrigido de acordo com Miranda, Castro e Kjerfve (2022), pela equação a seguir:

$$\theta = 90^\circ - (dd - D) - y \quad (7)$$

Sendo: dd o ângulo medido pelo ADCP, D a declinação magnética com o sinal negativo indicando a declinação para oeste e y o ângulo do eixo longitudinal com o sinal negativo indicando o sentido anti-horário. A subtração dos demais ângulos pelo ângulo de 90° indica a mudança de referencial dos eixos das abscissas e das ordenadas. A decomposição foi efetuada levando-se em conta a declinação magnética local (D) fornecida pela carta náutica 411 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN-MB) (Brasil, 2020): o valor de 21° . Para o alinhamento do eixo Oxy com o canal foi utilizado o ângulo de 50° .

Para a retirada dos dados incoerentes gravados pelo equipamento utilizou-se o método estatístico de eliminação de registros que excederam a média ± 3 vezes o valor do desvio padrão a partir da aplicação de uma janela móvel retangular com 0,5 horas de largura. As lacunas geradas com a retirada dos dados espúrios foram preenchidas com o uso de interpolação linear que não excedeu 1% do número total de dados da série original. Os dados de correntes foram interpolados ao longo da coluna de água na forma adimensional, como descrito no item 4.3.

Neste estudo foram adotadas as convenções de $u > 0$ e $u < 0$ para expressar velocidades longitudinais de maré de vazante e maré de enchente, respectivamente. Foi utilizada a

convenção de velocidades iguais a zero junto ao fundo ($u = 0$), ou seja, não houve escorregamento para a variação do campo de correntes.

4.7. Cálculos dos Valores Médios no Espaço e no Tempo

A interação numérica para as médias no espaço e no tempo foi realizada de acordo com os métodos propostos por Miranda, Castro e Kjerfve (2002) e Bergamo, Miranda e Corrêa (2002), nos quais o espaço equivale à profundidade. Para os perfis verticais de propriedades escalares denotados genericamente por $P = P(Z_j, t)$, amostradas em profundidades escalares discretas ($Z_j = 0, -0.1, -0.2, \dots, -1$), as médias desses perfis no tempo foram calculadas por interpolação numérica, conforme:

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = P(Z_j) = \frac{1}{T} \int_0^T P(Z_j, t) dt \quad (8)$$

$$\overline{P(Z_j, t)} = P(t) = \int_{-1}^0 P(Z_j, t) dZ \quad (9)$$

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P = \int_{-1}^0 P(Z_j) dZ \quad (10)$$

O símbolo ($\langle \rangle$) indica médias no tempo, já a barra ($\overline{\quad}$) indica média no espaço durante intervalos de tempo iguais a um período de um ciclo completo de maré (T) e ao longo da coluna de água.

Nas equações anteriores, $P(Z_j)$ é a média temporal, $P(t)$ é a média espacial e P é a média no tempo e no espaço ou valor residual aplicado ao perfil vertical observado de uma propriedade escalar qualquer $P(Z_j, t)$ que neste caso são representadas pela componente longitudinal da grandeza velocidade [$u = u(Z, t)$], temperatura [$T = T(Z, t)$] e salinidade [$S = S(Z, T)$]. Com base no período (T) equivalente ao ciclo completo de maré, a interpolação é feita com $T = n\Delta t = t_n - t_0$, onde $\Delta t = 1h$ e $n = 721h$. As integrações foram feitas numericamente aplicadas aos valores discretos no tempo e ou no espaço e discretizadas segundo Kjerfve (1975) e Miranda, Castro e Kjerfve (2002) da seguinte forma:

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{P(Z_j, t_0)}{2} + \sum_k P(K_j, t_k) + \frac{P(Z_j, t_n)}{2} \right] \quad (11)$$

$$\overline{P(t)} = \frac{1}{10} \left[\frac{P(0, t)}{2} + \sum_j P(Z_j, t) + \frac{P(1, t)}{2} \right] \quad (12)$$

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P = \frac{1}{n} \left[\frac{P(t_0)}{2} + \sum_k P(t_k) + \frac{P(t_n)}{2} \right] \quad (13)$$

Por meio desse método, baseados na metodologia proposta por Miranda, Castro e Kjerfve (2002), foram obtidos os perfis verticais quase estacionários para o período total do fundeio oceanográfico, da salinidade, temperatura e componente longitudinal da velocidade, bem como seus valores residuais, S_a , T_a e u_a .

4.8. Número de Richardson por Camada (Ri_L)

No presente estudo a estabilidade vertical da coluna de água foi calculada pelo Número de Richardson por Camada ou Número de Richardson Local (Ri_L), um número adimensional apresentado por Bowden (1963) calculado pela seguinte equação:

$$Ri_L = \frac{gh\Delta\rho_v}{\bar{u}^2 \cdot \bar{\rho}} \quad (14)$$

Onde g é a aceleração da gravidade, $h = h(t)$ é a profundidade local, $\Delta\rho_v$ é a diferença da densidade do fundo e da superfície, $\bar{u} = \bar{u}(t)$ é o valor médio da velocidade na coluna e $\bar{\rho}$ é a densidade média da coluna de água.

As condições de instabilidade e alta estabilidade vertical na coluna de água calculados pelo Número de Richardson Local (Ri_L) são definidos pelos limites inferiores ($Ri_L = 2$) e superiores ($Ri_L = 20$). Para valores os de Ri_L entre 2 e 20 ($2 < Ri_L < 20$) há uma formação de estratificação relativamente moderada e a coluna de água tem uma fraca estabilidade. Para valores $Ri_L > 20$ os mecanismos de mistura não foram suficientes para quebrar a estratificação da coluna de água apresentando uma alta estabilidade vertical. Para os valores de $Ri_L < 2$ os processos de mistura dominam na coluna de água indicando uma condição de instabilidade (Dyer, 1986).

4.9. Sedimentos de Fundo

4.9.1. Granulometria

No laboratório do ICMar as amostras de sedimentos foram caracterizadas por meio das técnicas de peneiramento e sedimentação de acordo com os procedimentos recomendados por Wentworth (1992). Para os procedimentos de peneiramento foram utilizadas malhas com aberturas conforme apresentadas na

Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação granulométrica e abertura das peneiras

Phi (ϕ)	Textura	Malha (mm)
-2	Cascalho (CSC)	4
-1		2
0	Areia Muito Grossa (AMG)	1
1	Areia Grossa (AG)	0,5
2	Areia Média (AM)	0,25
3	Areia Fina (AF)	0,125
4	Areia Muito Fina (AMF)	0,062
5	Silte Grosso (SG)	0,031
6	Silte Médio (SM)	0,015
7	Silte Fino (SF)	0,0078
8	Silte Muito Fino (SMF)	0,0039
9	Argila	0,0020

Fonte: Wentworth (1992).

Após a secagem em estufa à temperatura de 110 °C até constância de massa, o material amostral foi peneirado com agitador mecânico e registradas as massas retidas acumuladas com resolução de 0,01 g. Para o processo foi utilizada a balança analítica descrita no item 4.5 e um conjunto de peneiras padrão.

O cálculo das porcentagens de cada fração granulométrica na Escala de Wentworth (1992) e as análises estatísticas foram realizadas segundo Folk e Ward (1957), por meio do software livre *R Development Core Team*, 2009, pacote *Rysgran* (Gilbert; Camargo; Sandrini-Neto, 2015). A partir da granulometria foram compilados valores estatísticos da média e grau de seleção seguindo a classificação estatística descritiva desenvolvida por Folk e Ward (1957) como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Escala de grau de seleção Folk e Ward a partir da classificação granulométrica

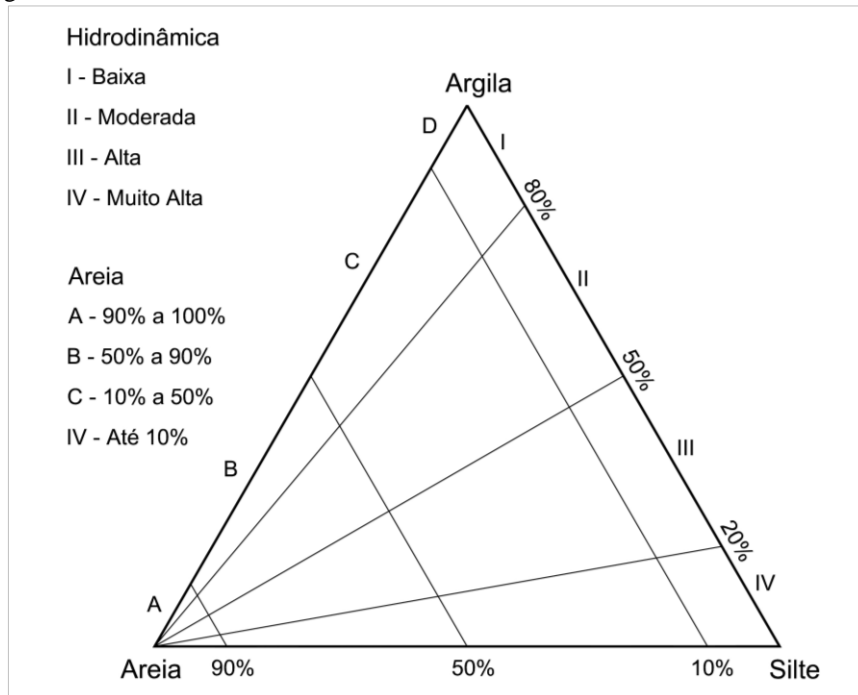
Phi (ϕ)	Classificação
< 0,35	Muito bem selecionado
0,35 a 0,50	Bem selecionado
0,50 a 0,71	Moderadamente bem selecionado
0,71 a 1,00	Moderadamente selecionado
1,00 a 2,00	Mal selecionado
2,00 a 4,00	Muito mal selecionado
> 4,00	Extremamente mal selecionado

Fonte: Folk; Ward, 1957.

4.9.2. Diagrama de Pejrup

O diagrama de Pejrup (1988) é um diagrama triangular utilizado para qualificar a hidrodinâmica em estuários a partir das porcentagens das classes granulométricas dos sedimentos depositados. A aplicação do diagrama utiliza o percentual de argila presente nos sedimentos para delimitar as áreas do diagrama colocando as amostras com teor de argila maior que 80% na fração caracterizando assim ambientes de hidrodinâmica “baixa”. Amostras com teor de argila menor que 20% são utilizadas para representar ambientes de hidrodinâmica “muito alta” e 50% de argila na amostra é utilizada para dividir a seção média do diagrama em duas partes iguais (alta e moderada hidrodinâmica). Dessa maneira, o diagrama proposto é dividido em 16 grupos nomeados por letras (A, B, C e D) e números (I, II, III e IV) que indicam as condições de deposição estuarina (Figura 10). Os dados resultantes foram expressos em porcentagem de grãos por classe textural definida na escala de Wentworth (1992).

Figura 10 – Diagrama de classificação da dinâmica do estuário pela composição granulométrica



Autor: Pejrup, 1988.

4.10. Composição Evolutiva

4.10.1. Variação das Profundidades

Buscando obter dados de batimetria da Área de Despejo do TMPM foram enviadas solicitações de informação junto ao sítio eletrônico da Vale no canal Fale Conosco, porém as mensagens não foram respondidas. Diante do insucesso, utilizaram-se novamente os preceitos da Lei nº 12.527, de 2011, solicitando os Relatórios de Monitoramento Ambiental do TMPM ao IBAMA, o órgão responsável pela licença ambiental desse terminal. Em resposta, o órgão enviou os relatórios com dados de julho de 2018 a dezembro 2023, início da vigência da atual licença ambiental e data do último relatório disponível, respectivamente. Os relatórios apresentam informações dos volumes mensais de material dragado no terminal, nos quais observam-se volumes de dragagem mensal variando de 46.750 m³ a 171.774 m³ com média mensal de 99.415 m³. Relatam ainda que os descartes ocorreram de forma distribuída na Área de Despejo do TMPM.

Para análise evolutiva do leito da Área de Despejo do Itaquí foram utilizados dados brutos de cinco Levantamentos Hidrográficos de Batimetria (LHB) realizados entre 2017 e 2023, seis relatórios informativos anuais de dragagens de manutenção de 2018 a 2023 e três

relatórios de fiscalização de dragagem de aprofundamento realizada em 2022 no Porto do Itaqui, obtidos junto à EMAP com a utilização da Lei de Acesso à Informação. Diante da ausência de batimetria da Área de Despejo da Ponta da Madeira, este trabalho limitou-se a estudar a capacidade de suporte operacional de Área de Despejo do Itaqui, pois foram disponibilizados dados detalhados dos LHB da área.

Os relatórios afirmam que os LHB utilizaram ecobatímetros multifeixe, sensores de compensação de movimento do tipo *Motion Reference Unit* (MRU) sempre com um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS). Nos relatórios disponibilizados consta que cada LHB foi precedido de nivelamento geométrico da estação maregráfica instalada no Itaqui e aferição do marégrafo para aquisição dos níveis de maré e posterior redução nos dados. Ainda segundo esses documentos, a aquisição de dados foi realizada conforme preconiza a Organização Hidrográfica Internacional para os Levantamentos Hidrográficos (S-44) e NORMAM 25 (2. rev.) e utilização do software *Hypack*, com inserção dos valores obtidos nas calibrações e verificações.

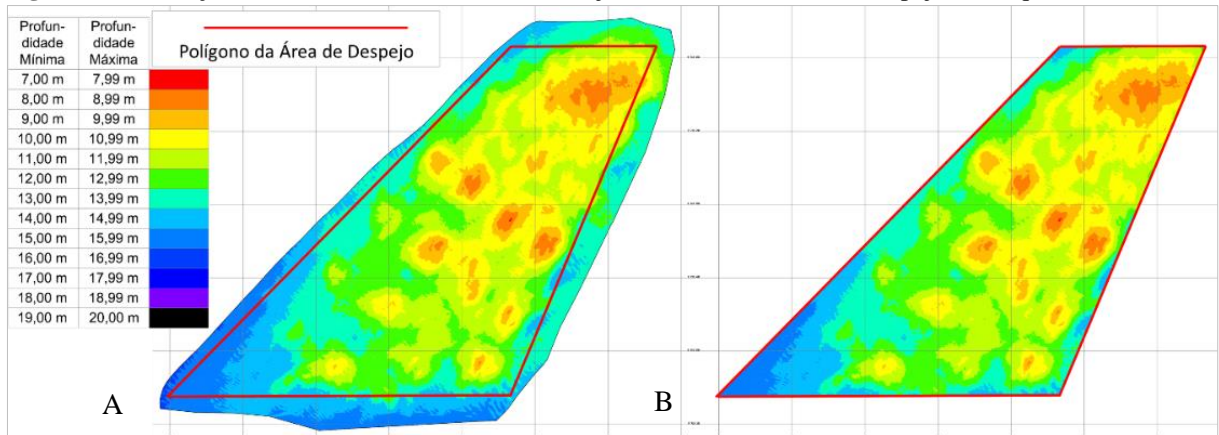
Os relatórios informam ainda que, para garantir a calibração do sistema de aquisição de dados, foram realizadas as medidas dos *offsets* verticais e horizontais entre os sensores na embarcação, a calibração do sistema dos ecobatímetros multifeixe e a determinação da imersão (*draft*), bem como a calibração da profundidade por meio da perfilagem da velocidade do som na coluna d'água. Com o objetivo de determinar a arfagem e os ângulos transversais e longitudinais (balanço e cabeceio) dos equipamentos na embarcação, fornecendo dessa forma maior confiabilidade aos dados de profundidade e posicionamento de cada feixe, realizou-se *patch test*, calibrações de inclinação (*pitch*), rotação (*roll*), guinada (*yaw*) e latência (*latency*). De acordo com os relatórios, os dados brutos foram processados para a remoção de interferências e dados espúrios (*spykes*) por meio da avaliação do casamento dos feixes.

Os arquivos de batimetria do tipo XYZ disponibilizados pela EMAP foram analisados com o uso do software *Civil3D* da *Autodesk*. O programa produz superfícies a partir de arquivos com a “nuvem de pontos” gerados nos diferentes LHB e, sobrepondo as várias superfícies, utiliza-se de seções transversais da área mapeada para calcular as variações superficiais por meio do método de seção média. Assim, é possível determinar a variação de volume da região estudada. O método de cálculo dos volumes por meio da seção média determina o volume de um maciço a partir distância de duas seções paralelas multiplicado pela área da seção intermediária.

Para a análise das superfícies foi necessário reduzir todos os levantamentos hidrográficos da região ao polígono da Área de Despejo, uma vez que os levantamentos nativos

possuem contornos diferentes uns dos outros devido às condições inerentes de cada levantamento como corrente, embarcação, vento e tripulação. Dessa forma, a análise das superfícies baseia-se em batimetrias de mesma área. A seguir (Fig. 11) apresenta-se a batimetria realizada em jul. 2023 com toda a área de levantamento (A) e o mesmo levantamento limitado ao polígono da Área de Despejo (B).

Figura 11 – Redução do Levantamento Batimétrico de julho de 2023 à Área de Despejo do Itaqui



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.10.2. Volumes Despejados

O cálculo do volume dragado nos portos é realizado por meio da comparação entre levantamentos batimétricos, conforme informado nos respectivos relatórios de dragagem. No entanto, nem todo o material que sai do leito é armazenado na cisterna da draga e transportado à área de despejo, pois parte é remobilizado e carregado pelas correntes no momento da passagem da cabeça de dragagem da draga *hopper* no solo ou sai no *overflow*, o processo de retirar o excesso de água da cisterna da barcaça com material granular fluidificado, principalmente quando a retirada é de sedimentos com maior parte de silte ou argila (Brasil, 2017). Segundo Bray, Bates e Land (1996), quando a dragagem é de areias, 10% a 25% do material presente no leito não são armazenados na cisterna e não chegam até a área de despejo a depender da granulometria (Tabela 7) e das condições de corrente no local da dragagem.

Tabela 7 – Taxa de material depositado na cisterna de uma draga *hopper* para areias.

Material dragado	Taxa de material depositado na cisterna
Areia fina	De 75% a 80%
Areia média	De 77% a 84%
Areia Grossa	De 80% a 90%

Fonte: Bray; Bates; Land, 1996.

Assim, considerando as altas correntes informadas na pesquisa de Santos, V. S. (2018) para o Porto do Itaqui e nos trabalhos de Chagas (2013), Figueiredo (2018) e Magalhães (2018) para o TMPM e a predominância de areia fina no material dragado, consideraram-se que 25% do material dragado nos portos não são transportados às respectivas áreas de despejo.

Segundo os relatórios de monitoramento de dragagem dos portos, nenhum material é lançado fora de suas respectivas áreas de despejo. No entanto, considerando que 52,11% da Área de Despejo do TMPM se sobrepõe à Área de Despejo do Itaqui, considerou-se que esse percentual do total despejado pelo TMPM ocorreu na área de estudo.

4.10.3. Taxa de Deposição ou Erosão de Material ($\delta\theta$)

Comparando as profundidades na Área de Despejo do Itaqui em diferentes momentos a partir dos LHB é possível obter a variação do volume no local (ΔVol). Numericamente, a ΔVol entre duas batimetrias consecutivas é a soma do Volume Despejado (V_{Desp}) com o Volume Transportado pelas Correntes (V_{TC}), sendo o último positivo para materiais trazidos pela corrente, assoreamento e negativo para materiais levados para fora da região, erosão, logo, $V_{TC} = \Delta Vol - V_{Desp}$.

A determinação da taxa de deposição ou erosão de material ($\delta\theta$) foi obtida pela razão entre o Volume Transportado pelas Correntes (V_{TC}) e o tempo decorrido entre os LHB analisados (equação 15), no qual $\delta\theta$ positivo representa transporte para dentro da Área de Despejo, assoreamento e negativo significa transporte para fora da Área de Despejo, ou seja, erosão.

$$\delta\theta = \frac{\Delta Vol - Vol_{Desp}}{Tempo} \quad (15)$$

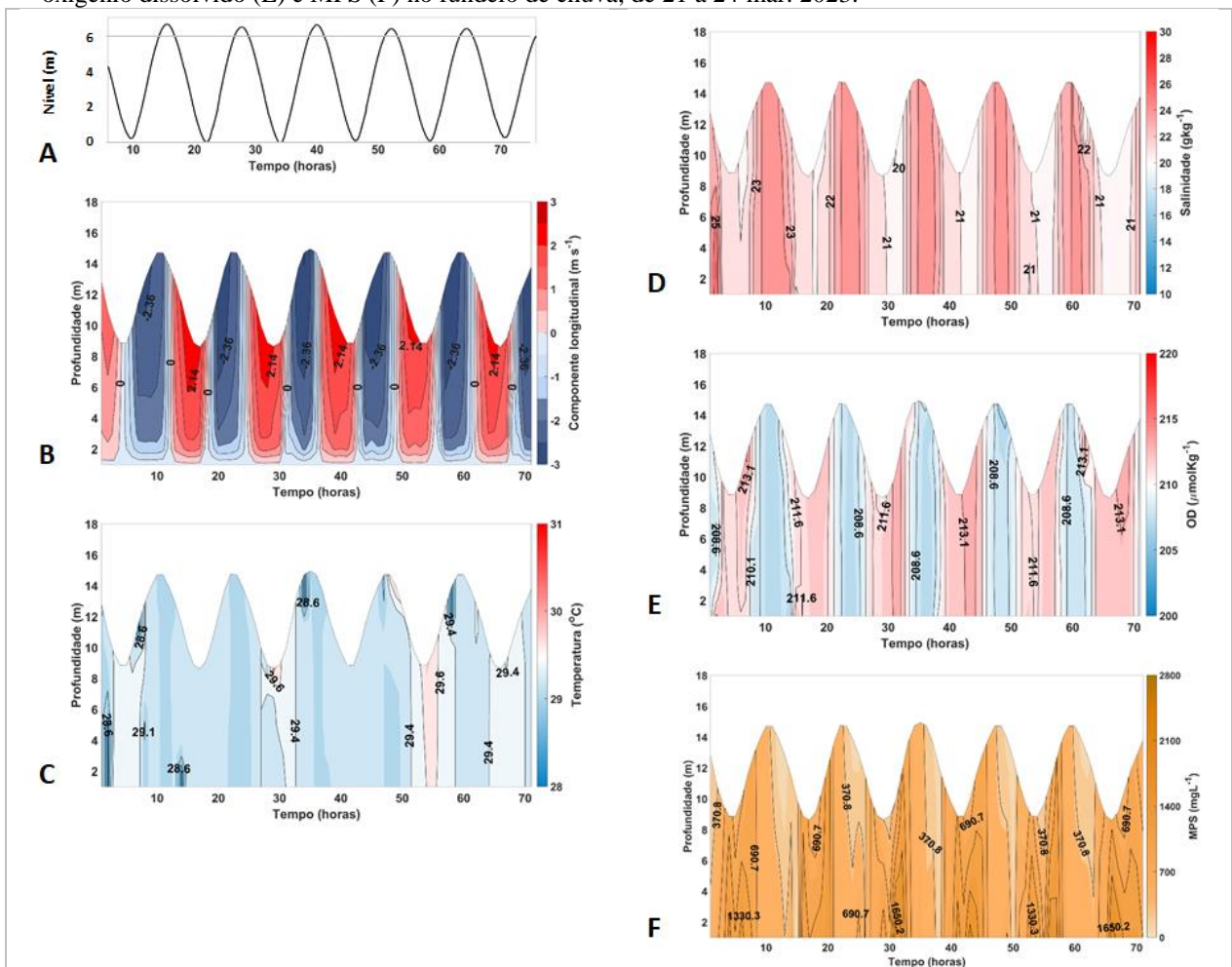
Destaca-se que, devido à ausência de dados de dragagem anteriores a junho de 2018, a taxa de deposição ou erosão de material foi calculada a partir do LHB de maio de 2019, pois essa é a primeira batimetria após os dados de dragagem disponibilizados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Campanha Hidrográfica na estação de chuva

A variação de maré durante o fundeio do período chuvoso realizada em mar. 2023 apresentou comportamento semidiurno. O nível máximo ocorreu no primeiro dia, 21 mar., às 19 h 22, quando atingiu 6,62 m; o menor valor de maré foi registrado na manhã de 22 de mar., às 14 h 07, com valor de -0,07 m, o que gera uma variação de 6,69 m (Figura 122-A).

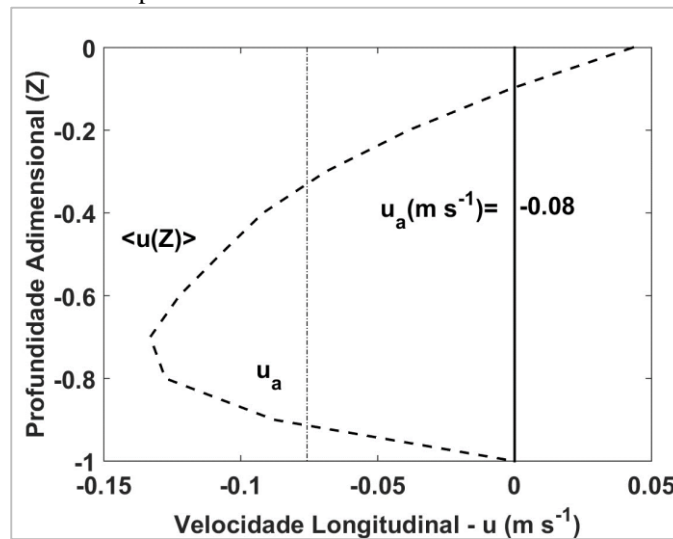
Figura 122 – Variação temporal: maré (A), velocidade longitudinal (B), temperatura (C), salinidade (D), oxigênio dissolvido (E) e MPS (F) no fundeio de chuva, de 21 a 24 mar. 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No período chuvoso os perfis da velocidade da componente longitudinal (u) apresentaram um escoamento bidirecional, com velocidade máxima na maré enchente de $-2,36 \text{ m s}^{-1}$ (2 h antes do estófo de premar) e máxima na vazante de $2,14 \text{ m s}^{-1}$ (1 hora antes do estófo de baixa-mar), valores que geram uma assimetria 10,2% (Figura 122-B). O valor médio da velocidade longitudinal na coluna d'água (Figura 133) no período analisado foi de $-0,08 \text{ m s}^{-1}$, valor que mostra uma velocidade resultante para o interior do estuário.

Figura 133 – Velocidade média em m s^{-1} na coluna d'água no fundeio no período de chuva



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na componente transversal da velocidade (v) também foi observado um escoamento bidirecional com velocidades máximas na maré enchente de $-0,62 \text{ m.s}^{-1}$ (3 h antes do estófo de premar) e na vazante de $0,58 \text{ m.s}^{-1}$ (2 h antes do estófo de baixa-mar).

Destaca-se a pequena contribuição da componente transversal na velocidade resultante, uma vez que a velocidade longitudinal corresponde a mais de 93% da velocidade máxima total no local para o período analisado, cujos valores máximos foram de $-2,48 \text{ m s}^{-1}$ e $2,52 \text{ m s}^{-1}$ na enchente e vazante, respectivamente.

Esses valores de velocidade corroboram os resultados obtidos por Moraes (1977), Santos, V. S. (2018), Lima (2019) e Carvalho (2023), autores que realizaram campanhas hidrográficas no CESM. A pesquisa de Santos, V. H. (2018) no Complexo Estuarino de Arraial – São José (MA), que também possui um regime de macromaré, obteve valores e velocidades da mesma ordem de grandeza.

Com variação de $1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura na coluna d'água apresentou características de homogeneidade vertical, com pequenas variações entre a maré vazante e enchente, onde a

temperatura mínima de 28,6 °C ocorreu em maré enchente e máxima de 29,6 °C em maré vazante, denotando uma relação entre as menores e maiores temperaturas com as correntes de enchente e vazante, respectivamente (Figura 122-C). Essas variações se assemelham aos dados apresentados por Santos, V. S. (2018), Lima (2019) e Carvalho (2023), os quais encontraram variações de temperatura menores que 1 °C em seus trabalhos realizados no CESM.

A variação temporal da salinidade apresentou características típicas de água estuarina, com pequeno gradiente vertical da coluna d'água representada por isohalinas verticais e com uma variação de 5 g kg⁻¹ entre a maré vazante e enchente, com valores mínimos de 20 g kg⁻¹ (no estofo de baixa-mar até 2 h após a virada da maré) e máximos de 25 g kg⁻¹ (no estofo de preamar até 2 após a virada da maré). Nota-se que a variação da salinidade segue a oscilação da maré, com os menores valores ocorrendo na baixa-mar e os maiores na preamar, ocorrendo de forma homogênea na coluna d'água (Figura 12-D).

O oxigênio dissolvido (OD) medido obteve valores variando entre 208,6 µmol kg⁻¹ e 213,1 µmol kg⁻¹, mantendo a característica de isohalinas próximas da verticalidade, peculiaridade de um ambiente bem misturado. Pode-se observar os maiores valores de OD foram notados próximos à superfície, o que sugere uma influência dos ventos na região (Figura 122-E).

O material particulado em suspensão apresentou concentrações elevadas durante o período amostral, variando de 370 mg L⁻¹ a 1.650 mg L⁻¹. As maiores concentrações do MPS foram observadas juntas ao fundo, associadas à remobilização dos materiais particulados pelas correntes de fundo. Destaca-se que ocorreram dois despejos de material dragado oriundo do Terminal Marítimo Ponta da Madeira horas antes dos maiores índices de MPS registrados no período. Os valores estão superiores aos valores obtidos por pesquisas realizadas no CESM (Santos, V. S., 2018; Lima, 2019 e Carvalho, 2023) e no CEASJ (Santos, V. H., 2018), muito provavelmente porque as citadas pesquisas não foram realizadas em Área de Despejo (Figura 12-F).

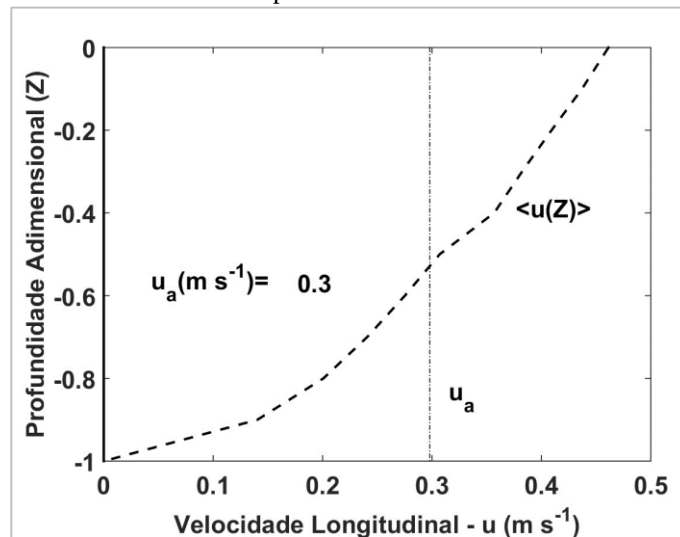
5.2. Campanha Hidrográfica na estação de seca

Na segunda campanha da pesquisa, realizada em set. 2023, período de seca, a variação de maré durante o fundeio apresentou comportamento semidiurno. O menor valor do nível de maré foi registrado no dia 16 set., às 16 h 02, com valor de 0,85 m; o nível máximo ocorreu no mesmo dia, às 20 h 07, quando atingiu 5,93 m, o que gera uma variação de maré de 5,08 m.

Observa-se que a altura de maré no período de seco foi de ligeiramente menor do que no período de chuva (Figura 15-A).

No período de seca os perfis da velocidade do componente longitudinal (u) apresentaram um escoamento bidirecional com velocidades máximas na maré enchente de $-1,5 \text{ m s}^{-1}$ (2 h antes do estofa de premar) e na vazante de $2,0 \text{ m s}^{-1}$ (1 h antes do estofa de baixa-mar), valores que geram uma assimetria 25% (Figura 15-B). O valor médio da velocidade longitudinal na coluna d'água no período analisado foi de $0,3 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 14), valor que demonstra uma velocidade resultante para o fora do estuário. Em comparação com o período chuvoso houve uma inversão do sentido da resultante e o módulo dessa velocidade mais que triplicou.

Figura 14 – Velocidade média em m s^{-1} na coluna d'água no fundeio no período de seca



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a componente transversal da velocidade (v) também foi notado um escoamento bidirecional com velocidades máximas na maré enchente de $-0,43 \text{ m s}^{-1}$ (3 h antes do estofa de premar) e na vazante de $0,57 \text{ m s}^{-1}$ (2 h antes do estofa de baixa-mar).

No período de seca repete-se a pequena contribuição da componente transversal na velocidade total, uma vez que a velocidade longitudinal corresponde a mais de 92% da velocidade máxima total no local, cujos valores máximos na enchente e vazante foram de $-1,56 \text{ m s}^{-1}$ e $2,44 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. Os resultados de velocidade reafirmam as pesquisas de Moraes (1977), Santos, V. S. (2018), Lima (2019) e Carvalho (2023), autores que realizaram campanhas hidrográficas em complexos estuarinos de macromaré e obtiveram valores de velocidades semelhantes.

Assim como no período de chuva, a temperatura na coluna d'água apresentou característica de homogeneidade vertical no período seco com pequenas variações entre a maré vazante e enchente, quando a temperatura mínima de 28,6 °C ocorreu no estófo de preamar e máxima de 29,3 °C no estófo de baixa-mar denotando uma relação entre as menores e maiores temperaturas com as correntes de enchente e vazante, respectivamente, com uma amplitude de 0,7 °C (Figura 15-C). O resultado de baixa amplitude de temperatura é comum nos estuários às margens da linha do Equador como nos rios Guamá e Acará/Moju, na região Amazônica (Bezerra; Rosário; Rollnic, 2011) e no rio Merbok, na Malásia (Fatema; Maznah; Isa, 2014).

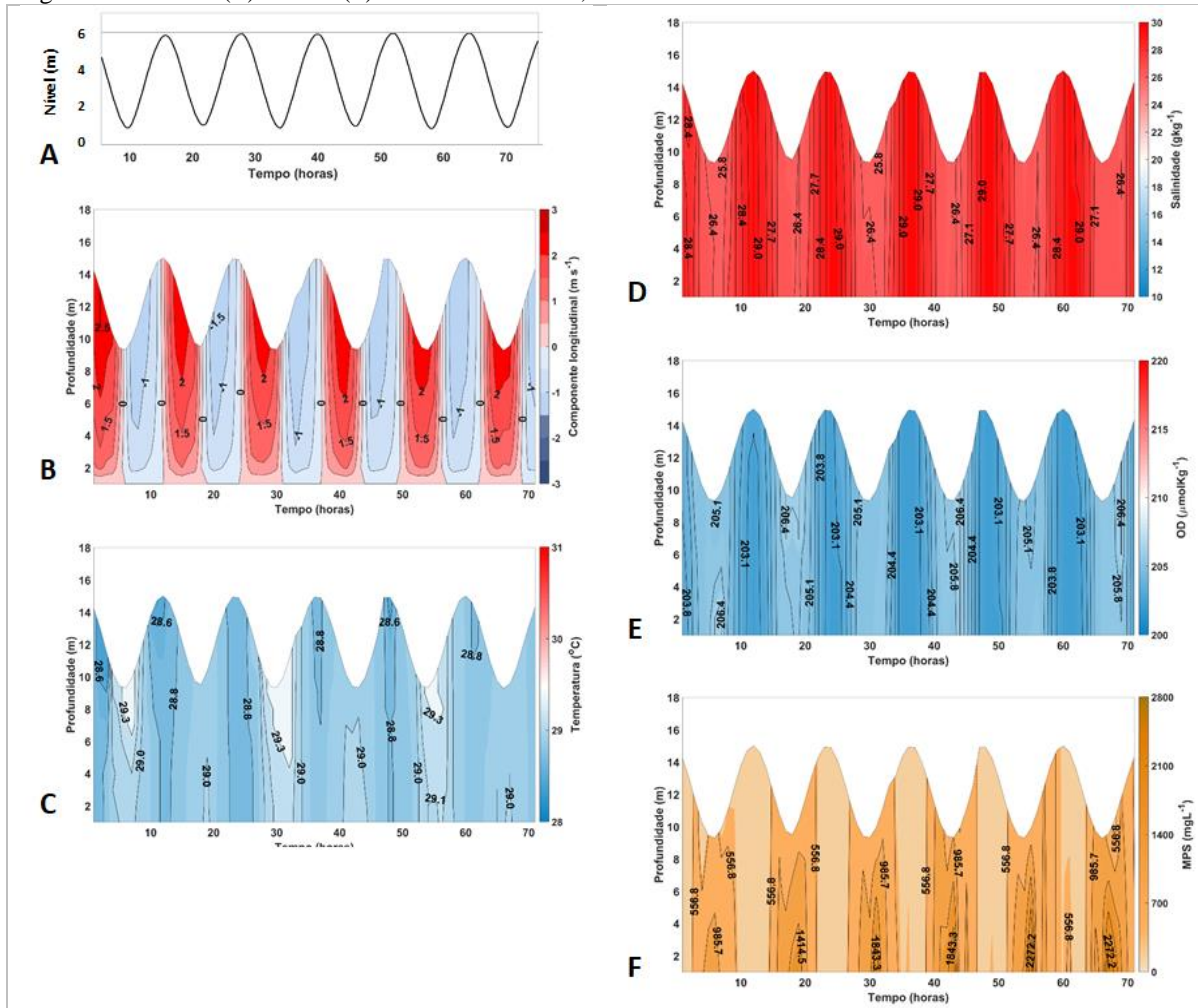
A variação temporal da salinidade apresentou características típicas de água estuarina com pequeno gradiente vertical da coluna d'água representada por isohalinas verticais e com uma variação de 4,2 g kg⁻¹ entre a maré vazante e enchente com valores de 25,8 g kg⁻¹ no estófo de baixa-mar até 2 h após a virada da maré e máximos de 29,0 g kg⁻¹ no estófo de preamar até 2 h após a virada da maré (Figura 15-D). Nota-se que a variação da salinidade segue a oscilação da maré com os menores valores ocorrendo na baixa-mar e os maiores na preamar ocorrendo de forma homogênea na coluna d'água.

O oxigênio dissolvido (OD) medido obteve valores entre 203,1 µmol kg⁻¹ e 206,4 µmol kg⁻¹ gerando uma baixa amplitude para o parâmetro mantendo a característica de isohalinas próximas da verticalidade, peculiaridade de um ambiente bem misturado. Pode-se observar que os maiores valores de OD foram alcançados na proximidade da superfície, o que sugere uma influência dos ventos na região, mais evidentes no segundo semestre, no período de seca (Figura 15-E).

Os resultados obtidos para salinidade e OD são análogos aos apresentados por outras pesquisas em ambientes de macromaré como Santos, V. H. (2018) no CESJA e Santos, V. S. (2018), Lima (2019) e Carvalho (2023) no CESM.

O material particulado em suspensão apresentou concentrações elevadas durante o período amostral variando de 556,8 mg L⁻¹ a 2.272,2 mg L⁻¹ o que gera uma amplitude de 1.715,4 mg L⁻¹. As maiores concentrações do MPS foram observadas junto ao fundo, associadas à remobilização dos materiais particulados pelas correntes de fundo (Figura 15-F). Destacam-se que ocorreram três despejos de material dragado oriundo do Terminal Marítimo Ponta da Madeira horas antes dos maiores índices de MPS registrados no período.

Figura 15 – Variação temporal: maré (A), velocidade longitudinal (B), temperatura (C), salinidade (D), oxigênio dissolvido (E) e MPS (F) no fundo de seca, de 14 a 17 set. 2023



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores máximos, mínimos e variações dos resultantes de salinidade, OD e temperatura obtidos nas campanhas de chuva e seca corroboram os trabalhos de Santos, V. S. (2018) e Lima (2019), que encontraram valores da mesma ordem de grandeza nas pesquisas realizadas no CESM. Já os dados de MPS obtidos neste trabalho são elevados em comparação com os trabalhos dos citados pesquisadores, que encontraram até 852 mg L⁻¹ e 1.100 mg L⁻¹ de MPS nas suas pesquisas.

5.3. Número de Richardson por Camada (RiL)

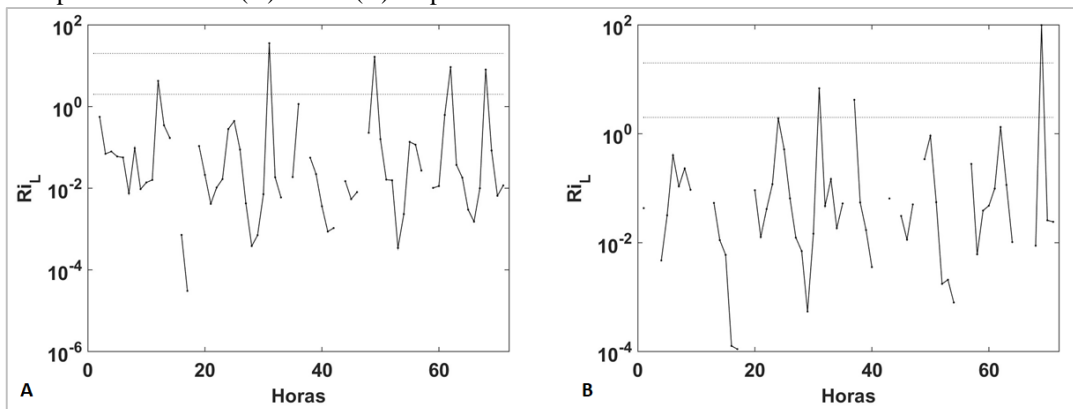
Quanto à estratificação do estuário segundo o número de Richardson por Camada (RiL) para o período de chuva (Figura 16-A), foram obtidos 66 registros com RiL < 2 indicando um estuário não estratificado, ou seja, bem misturado. Quatro registros indicam 2 < RiL < 20

apontando estuário com estratificação moderada e um registro com $Ri_L > 20$ indicando estuário estratificado.

Já no período de seca (Figura 16-B) foram obtidos 67 registros com $Ri_L < 2$ indicando um estuário não estratificado, bem misturado, três registros indicam $2 < Ri_L < 20$ apontando estuário com estratificação moderada e um registro com $Ri_L > 20$ indicando estuário estratificado. Observa-se que 93% e 94% dos registros indicam um estuário não estratificado nas campanhas de chuva e seca, respectivamente, o que permite afirmar que o estuário é bem misturado nos períodos analisados.

Os pontos de baixa estratificação estão relacionados com instantes de estufa de maré, comum aos estuários de regime de maré classificados como macromaré, similarmente aos trabalhos de Cavalcante, Feary e Kjerfve (2013), Santos, V. H. (2018) e Carvalho (2023), que analisaram o estuário do rio Caeté, no Pará, o CESJA e o CESM, respectivamente.

Figura 16 – Número de Richardson por Camada (Ri_L) apontado grande estratificação do estuário nas campanhas de chuva (A) e seca (B) no ponto de fundeio



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. Sedimentos de Fundo

5.4.1. Granulometria e Seleção dos Grãos

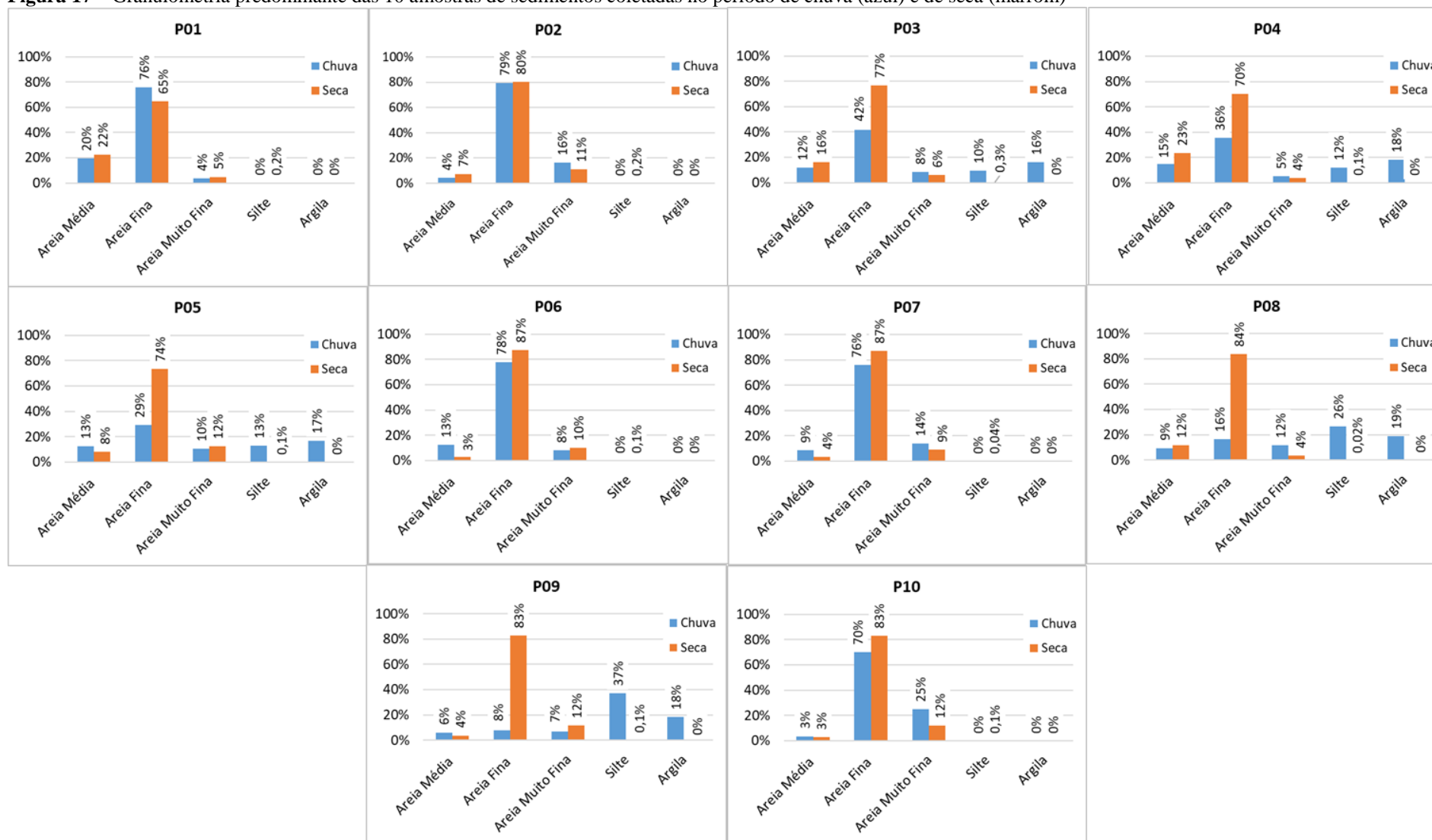
Quanto à classificação granulométrica média segundo a escala de Wentworth (1992), no período de chuva, em azul na Figura 17, das dez amostras coletadas oito obtiveram areia fina como a maior parcela em sua composição variando de 29% a 79%. Nas amostras P08 e P09 foi observada a predominância de silte grosso com frações de 26% e 37%, respectivamente. Destaca-se que em cinco amostras não foram identificadas quaisquer frações de argila ou silte e em todas as amostras foram verificadas frações de cascalho, porém com percentuais irrisórios, menores que 4%.

Quanto ao critério de seleção dos grãos, classificação de seleção dos grãos proposta por Folk e Ward (1957), no período chuvoso as amostras P01, P02, P06 e P07 receberam classificação de “grãos bem selecionados” e a amostra P10 de “grãos moderadamente bem selecionados”, o que demonstra que os grãos possuem uniformidade de tamanho. As amostras P03, P04, P05, P08 e P09 foram classificadas como “grãos muito pobremente selecionados” denotando variação na dimensão dos grãos.

Já no período seca, em marrom na Figura 17, a granulometria de todas as amostras obtiveram areia fina como a maior parcela de composição variando entre 65% e 87%. Todas as amostras demonstraram ausência de argila em sua composição e as parcelas de cascalho, areia muito grossa e silte foram identificadas em algumas amostras com menos de 3% da composição, consideradas dessa forma como irrelevantes.

Quanto ao critério de seleção dos grãos segundo Folk e Ward (1957), as mostras P01 e P05 foram classificadas como “grãos moderadamente selecionados” e as demais amostras receberam classificação de “grãos bem selecionados”. Assim, conforme a escala de classificação de seleção, as amostras possuem uniformidade das dimensões dos grãos.

Figura 17 – Granulometria predominante das 10 amostras de sedimentos coletadas no período de chuva (azul) e de seca (marrom)



Fonte: Elaborado pelo autor.

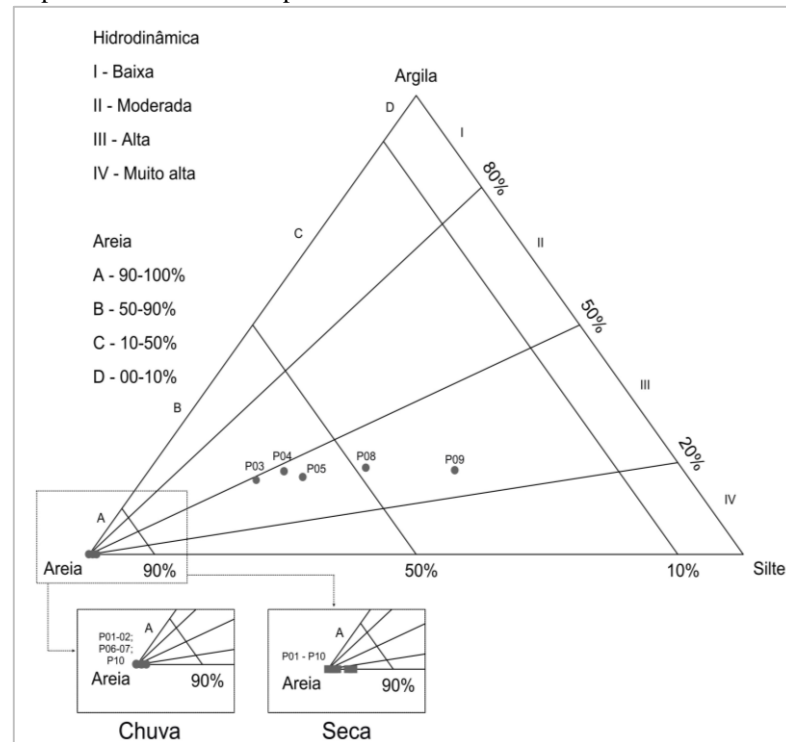
5.4.2. Diagrama de Pejrup

Os resultados obtidos a partir das análises granulométricas dos sedimentos foram plotados no diagrama de Pejrup (Figura 18), com a delimitação das áreas representativas da hidrodinâmica ocorrente no estuário.

No período chuvoso as amostras P03, P04, P05, P09 e P10 foram classificadas como pertencentes ao grupo de “hidrodinâmica alta”, já as amostras P01, P02, P06, P07 e P08 receberam classificação de “hidrodinâmica muito alta”. Para as amostras coletadas no período de seca todas obtiveram mais de 90% de areia em sua composição com “hidrodinâmica muito alta” pertencentes ao grupo A-IV.

Os resultados corroboram os dados das campanhas hidrográficas refletindo um ambiente de alta hidrodinâmica. Portanto, considerando os dados obtidos das velocidades de correntes e as análises do Diagrama de Pejrup por meio dos sedimentos, pode-se inferir que ambos indicaram hidrodinâmica alta na Área de Despejo do CPSL. Outros estudos obtiveram resultados similares para a CESH como Amaral (2006), Chagas (2013), Santos, V. S. (2018), Figueiredo (2018) e Lima (2019).

Figura 18 – Diagrama de Pejrup das 20 amostras coletadas nos 10 pontos no período de chuva e no período de seca



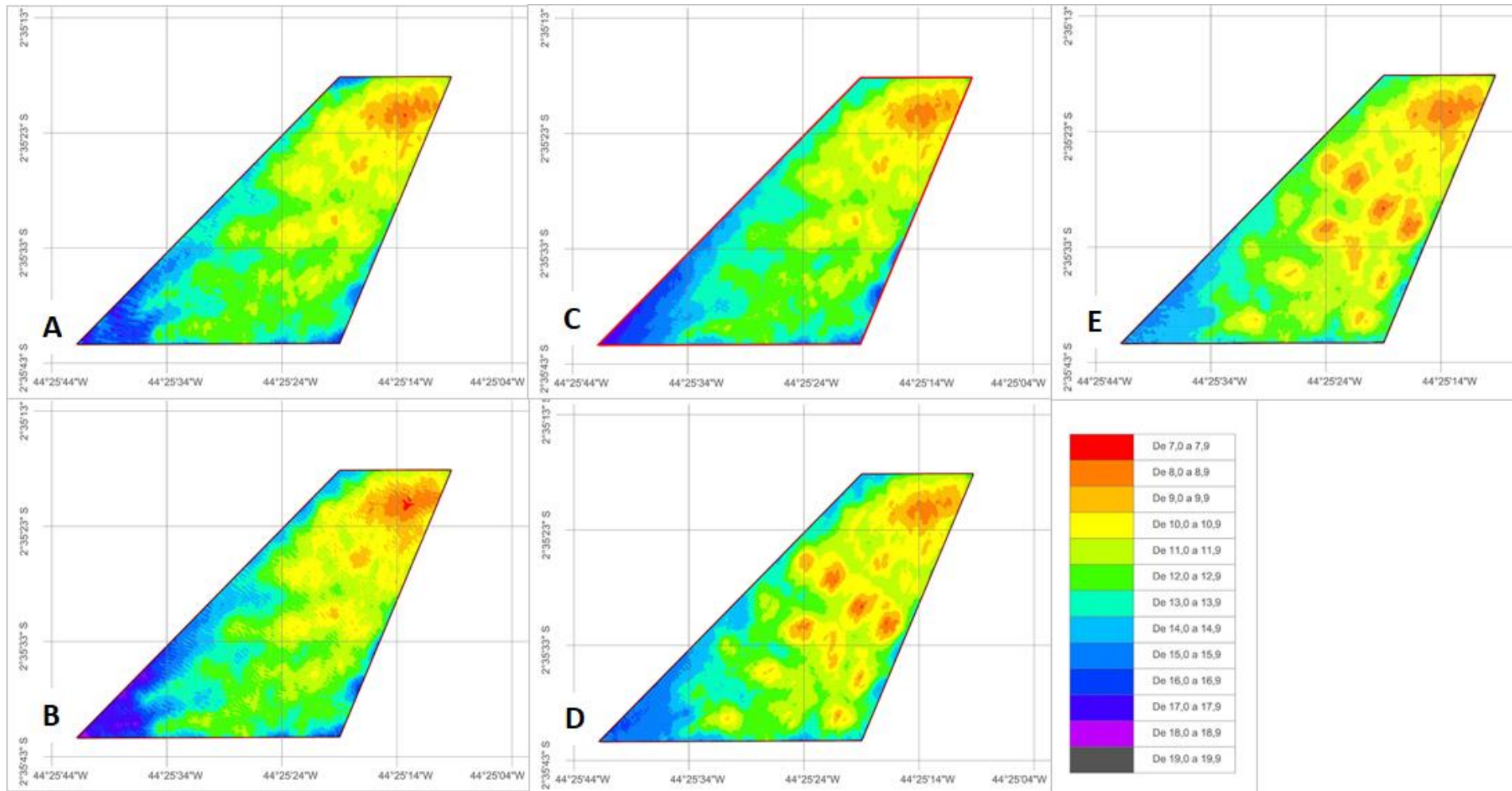
Fonte: Elaborado pelo autor

5.5. Composição Evolutiva

5.5.1. Variação das profundidades

Inicialmente foram geradas as superfícies com cada um dos arquivos do tipo XYZ da Área de Despejo. Com a análise da batimetria de mar. 2017 (Figura 19-A) identificou-se que a menor profundidade era de 7,78 m e a máxima de 17,96 m. Nota-se que a região nordeste da Área de Despejo mais próxima do Complexo Portuário São Luís possui menor profundidade, sugerindo o ponto de maior lançamento de material dragado. Em maio 2019 a batimetria (Figura 19-B) apontou uma profundidade mínima de 7,53 m e a máxima era de 19,23 m. O levantamento de dezembro de 2021 (Figura 19-C) informa a profundidade mínima de 8,03 m e a maior de 18,10 m. Já em dezembro de 2022 (Figura 19-D), essas cotas identificadas tiveram a mínima de 7,73 m e máxima de 16,53 m, evidenciando uma alteração da morfologia na área, na qual a região central e sul tiveram uma nítida redução de profundidade. Em nov. 2023 a batimetria (Figura 19-E) indica profundidade mínima de 7,72 m e máxima de 15,81 m.

Figura 19 – Batimetrias de mar./2017 (A), maio/2019 (B), dez./2021, dez./2022 e nov./2023



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.2. Volumes despejados

A partir da análise dos relatórios de monitoramento ambiental do TPM observam-se altos volumes de dragagem para a manutenção das profundidades dos berços (Tabela 8) com volume médio anual de 1.193.358 m³ e mensal de 99.415 m³. O volume mensal mínimo dragado foi de 46.750 m³ em nov. 2021 e o máximo de 171.774 m³ em maio 2019.

Tabela 8 – Volumes mensais dragados no TPM em m³

Mês / Ano	Volume dragado (m ³)					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro		90.718	89.551	126.950	99.456	98.757
Fevereiro		105.851	109.460	89.784	94.406	78.042
Março		116.884	91.854	111.774	50.563	126.237
Abril		120.842	93.277	116.628	81.159	107.062
Maio		171.774	83.764	86.608	104.246	99.284
Junho		105.225	93.607	92.765	88.053	99.863
Julho	105.516	89.695	113.796	100.364	77.757	103.697
Agosto	115.594	96.668	102.787	92.945	97.803	90.830
Setembro	87.742	100.489	114.242	94.157	110.374	104.436
Outubro	96.840	112.879	97.292	122.986	95.680	82.159
Novembro	89.683	107.766	108.381	46.750	83.021	104.846
Dezembro	103.370	81.605	89.883	97.898	95.997	121.032
Total no período	598.745	1.300.396	1.187.894	1.179.609	1.078.515	1.216.245
Média mensal	99.791	108.366	98.991	98.301	89.876	101.354

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido ao baixo volume dragado para a manutenção das profundidades no Porto do Itaqui (Tabela 9) não foi possível estabelecer uma média mensal. Observam-se que as dragagens de manutenção anuais variaram de 7.830 m³ em 2019 a 67.289 m³ em 2023 com média anual de 22.337 m³, o que corresponde a 1,87% da média anual de dragagem no TPM. Notam-se que os serviços de dragagem no Itaqui foram realizados na média de cinco dias em cada ano. Os relatórios informativos anuais de dragagens de manutenção do Itaqui demonstram que o aumento de volume observado no ano de 2023 ocorreu pelo assoreamento ao norte da Ilha de Guarapir, que passou por uma dragagem de aprofundamento em 2022 que retirou 312.658 m³ de material.

Tabela 9 – Volumes dragados para manutenção do Porto do Itaqui em m³

Ano	Período	Volume Dragado
2018	24 a 26 fev./2018 e 30 e 31 out./2018	10.393
2019	13 e 14 jan./2019	7.830
2020	04 a 07 jan./2020	17.140
2021	22 a 24 abr./2021 e 29 a 31 dez./2021	20.866
2022	09 e 10 jan./2022 e 26 jul./2022	10.502
2023	10 a 12 abr./2023 20 e 21 ago./2023 27 e 28 ago./2023 22 a 25 nov./2023	67.289
	Média anual	22.337

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o volume dragado foi possível calcular os valores descartados na Área de Despejo do Itaqui a partir de jul. 2018 considerando que descarte algum ocorreu fora de suas respectivas áreas e que 52,11% do descarte do TPM transcorreu na Área de Despejo do Itaqui devido à sobreposição das áreas de despejo dos portos. O volume descartado na área de despejo está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Volume (m³) mensal despejado na Área de Despejo do Itaqui

Mês / Ano	Volume (m³)					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Janeiro		41.328	47.854	57.440	44.121	53.737
Fevereiro		41.369	42.780	35.090	36.896	30.501
Março		45.681	35.899	43.684	19.761	49.337
Abril		47.228	36.455	45.581	266.212	41.843
Mai		67.134	32.737	33.849	40.742	38.803
Junho		41.125	36.584	36.255	34.413	39.029
Julho	41.238	35.055	44.474	47.050	33.015	40.527
Agosto	45.177	37.780	40.172	36.325	38.224	55.685
Setembro	34.292	39.274	44.649	36.799	43.137	40.816
Outubro	42.524	44.116	38.024	48.066	37.394	32.110
Novembro	35.050	42.118	42.358	18.271	32.447	56.116
Dezembro	40.400	31.893	35.129	38.261	37.518	47.302
Total no período	96.132	204.501	194.299	195.828	407.107	236.241
Média mensal	16.022	17.042	16.192	16.319	33.926	19.687

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.3. Taxa de deposição ou erosão de material ($\delta\theta$)

Considerando que o primeiro LHB disponibilizado após os dados de material dragado é de maio de 2019, as taxas de deposição ou erosão de material ($\delta\theta$) foram calculadas a partir dessa data. Assim, foram realizadas as comparações entre 4 LHB: de maio/2019, dezembro/2021, dezembro/2022 e novembro/2023, com 30, 12 e 11 meses entre os LHB informados, respectivamente (Tabela 11). Destaca-se que ausência de dados de dragagem do TMPM anteriores a maio de 2018 impossibilitou a análise comparativa entre as batimetrias de março/20217 e maio/2019.

Tabela 11 – Período de comparação entre os LHB

T₀	T₁	Tempo decorrido (mês)
Maio/2019	Dezembro/2021	31
Dezembro/2021	Dezembro/2022	12
Dezembro/2022	Novembro/2023	11

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise comparativa entre os LHB da Área de Despejo do Itaqui apontou que entre maio/2019 e dez./2021 foram apresentadas zonas de erosão com variação de 78.809 m³ e zonas de assoreamento com variação de 47.124 m³ (Figura 20B). Considerando que no período foram despejados, em média, 40.452 m³ mês⁻¹ de material, a Taxa de Erosão obtida é de -41.474 m³ ao mês⁻¹. No ponto de maior erosão a superfície aprofundou 2,46 m, enquanto no de maior assoreamento a superfície foi elevada em 2,76 m e um aprofundamento médio em toda a área foi de 0,088 m.

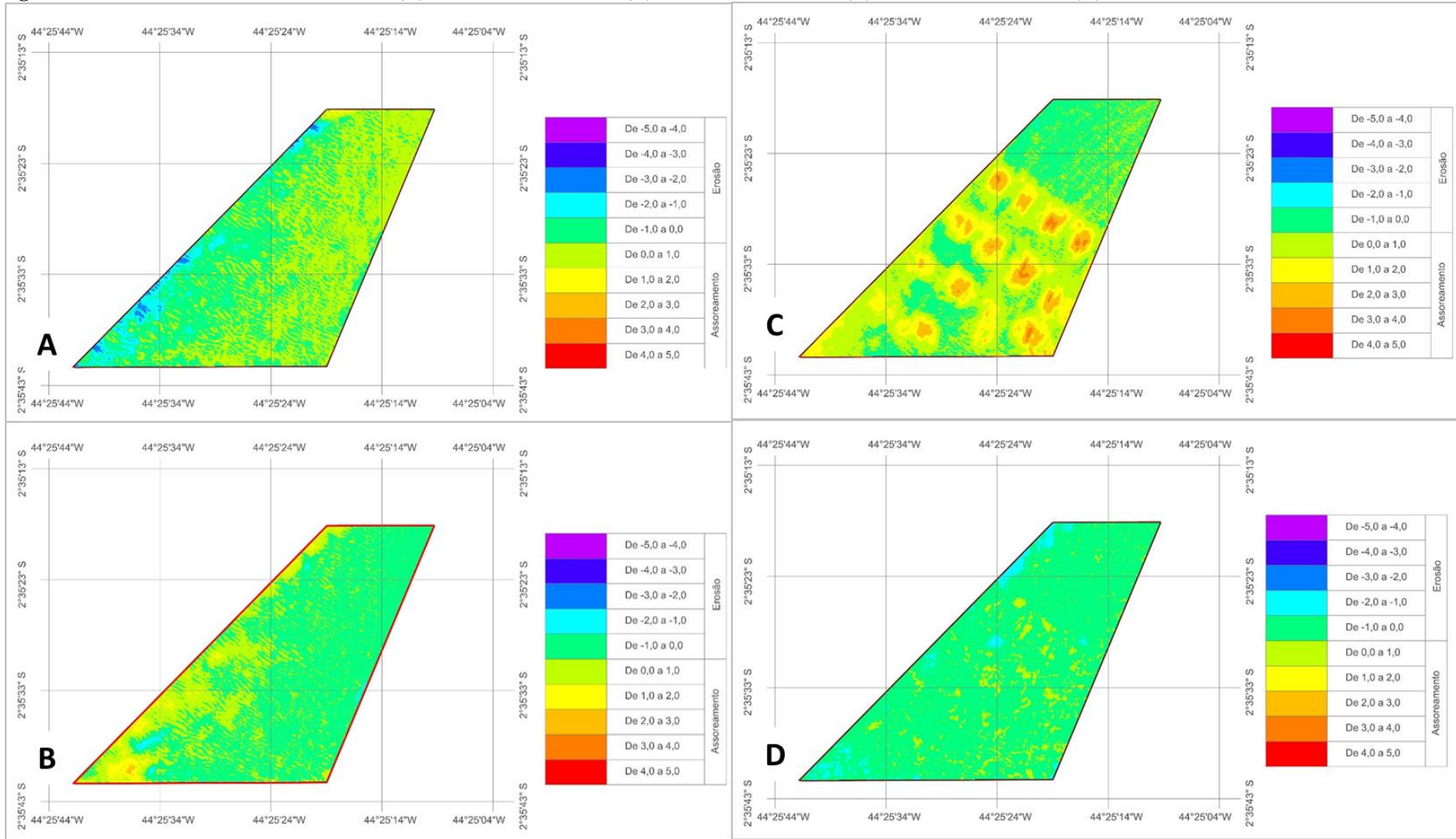
Já a anomalia entre os LHB de dez./2021 e dez./2022 (Figura 20-C) mostra zonas de erosão com variação de 21.720 m³ e zonas de assoreamento com variação de 216.323 m³ concentradas nas regiões central e sul da Área de Despejo do Itaqui, o que representa perda de profundidades no local. Os despejos de material na região obtiveram média 55.385 m³ mês⁻¹ no período analisado, o que gera uma Taxa de Erosão -39.168 m³ mês⁻¹ com redução média da profundidade de 0,54 m em toda a área. No ponto de maior erosão a superfície aprofundou 1,73 m e no ponto de maior assoreamento a superfície foi elevada em 4,11 m.

A anomalia entre as batimetrias de dez. 2022 e nov. 2023 (Figura 20-D) apresenta zonas de erosão com variação de 122.554 m³, zonas de assoreamento com variação de 3.760 m³ e aprofundamento médio de 0,06 m em toda a área. Considerando que foram despejados em média 41.810 m³ mês⁻¹ de material, obtém-se uma Taxa de Erosão de -52.609 m³ mês⁻¹. No

ponto de maior erosão a superfície aprofundou 1,03 m e no de maior assoreamento a superfície foi elevada em 2,10 m.

Notam-se que os resultados corroboram os dados das campanhas hidrográficas, Número de Richardson por Camada, granulometria e diagrama de Pejrup, indicando altos índices de hidrodinâmica para o local nas ocasiões analisadas. Pode-se afirmar que a hidrodinâmica da região favorece a retirada de sedimentos da Área de Despejo do Itaquí.

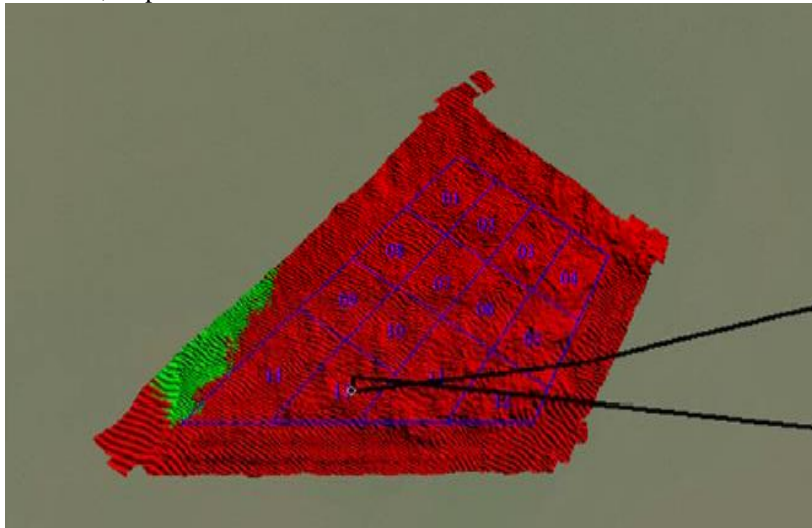
Figura 20 – Anomalia: mar./2017-maio/2019 (A), maio/2019-dez./2021 (B); dez./2021-dez./2022 (C) e dez./2022-dez./2023 (D)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A redução de profundidade apontada nas regiões sul e central da Área de Despejo do Itaqui e a menor taxa de erosão entre dez./2021 e dez./2022 (Figura 20-C) são atribuídas à dragagem de aprofundamento no entorno da Ilha de Guarapirá, no Itaqui, de onde foram retirados 312.658 m³ de material. Segundo informações do relatório dessa dragagem ocorrida num período de 16 dias entre março e abril de 2022, para “o descarte do material dragado [...] somente uma parte da área de despejo foi utilizada. Aquela área é subdividida em áreas menores, utilizadas para disposição na seguinte ordem (ciclo repetitivo)”. Observam-se que as 14 células de lançamento (Figura 21) coincidem com os pontos de redução de profundidade na região para o período. O relatório informa ainda que foram realizados 185 descartes na área no decorrer da dragagem.

Figura 21 – Área de despejo utilizada durante a dragagem de aprofundamento no Itaqui entre mar. e abr. 2022. A área subdividida em malha com 14 seções para o despejo. A linha preta e o ponto azul apresentam o deslocamento do barça e despejo realizado no centro da zona 13, respectivamente



Fonte: EMAP, 2022.

Os dados mostram alta capacidade de retirada de sedimentos da área analisada e sugerem que a região está sob um regime de alta energia fazendo que os sedimentos lançados nas campanhas de dragagem sejam retirados pelas correntes. Esse resultado corrobora o estudo de Chagas (2013) e Figueiredo (2018), que concluíram que as correntes em regiões distintas do CESM possuem grande capacidade de transportar sedimentos.

6. CONCLUSÕES

A pesquisa para caracterização das correntes e determinação do transporte de material na Área de Despejo do Itaqui proporcionou grandes avanços na compreensão da dinâmica ambiental no CESH contribuindo para a tomada de decisões nos portos que demandam dragagens para a continuidade das operações com eficiência. Destaca-se que esta pesquisa tão somente foi realizada com eficácia após a disponibilização de dados pelas empresas do setor portuário, o que mostra que a parceria entre academia e empresas é importante para o crescimento sustentável de ambos os lados.

Os valores do parâmetro Número de Richardson por Camada (Ri_L) permitem concluir que a área estudada possui alta hidrodinâmica. Já as estruturas térmica e salina observadas na região apresentaram comportamento quase homogêneo durante todo o período amostral, reflexo da sazonalidade climática da região, evidenciando dois períodos bem caracterizados: seca e chuva. A análise dos índices termohalinos e dos percentuais de saturação de oxigênio sugerem a presença de duas massas de água: Água Costeira e Água Estuarina.

As concentrações de MPS e os fluxos instantâneos mostraram uma pluma de dispersão contínua na região da Área do Despejo do Itaqui sugerindo um elevado transporte de sedimentos em função da alta hidrodinâmica da região. As elevadas concentrações de MPS próximas ao fundo são atribuídas à capacidade da corrente de ressuspender e transportar o material de fundo bem como os despejos de material dragado observados próximos ao ponto de fundeio durante as campanhas hidrográficas. Pode-se concluir ainda que a alta capacidade de mistura das massas de água que compõem o CESH dificulta a decantação do MPS e propicia o seu transporte para outras regiões do complexo. Destaca-se que há a necessidade de estudar o destino final dos sedimentos retirados do local pelas correntes.

Os resultados de granulométrica com ausência de material fino como argilas e siltes, as análises estatísticas e o Diagrama de Pejrup permitem afirmar que a Área de Despejo do Itaqui é um ambiente de hidrodinâmica alta, corroborando as medições de correntes no local e a classificação de Ri_L .

Os resultados do processamento dos dados brutos dos Levantamentos Hidrográficos de batimetria e dos relatórios de monitoramento das dragagens disponibilizados permitem concluir que há uma variação do leito local atribuída não somente aos altos valores de descarte de materiais oriundos das dragagens nos portos da região, mas também à capacidade das correntes de transportar materiais de fundo para outras regiões do CESH.

Assim, conclui-se que no período analisado a Área de Despejo do Itaqui sofreu leve assoreamento pelo descarte de material dragado visto que a média do volume de material transportado do local pelas correntes é ligeiramente menor do que a média de material descartado pelas dragagens. Pode-se afirmar ainda que a dragagem de aprofundamento realizada do Porto do Itaqui em 2022 teve influência nesse resultado causando um assoreamento pontual na região. Por fim, afirma-se que a Área de Despejo do Itaqui tem capacidade operacional para receber materiais de dragagem de manutenção, no entanto, grandes volumes descartados em curto espaço de tempo, como em dragagens de aprofundamento, podem comprometer tal potencial.

REFERÊNCIAS

ABDALA, V. Mais da metade da população brasileira vive no litoral. **Agência Brasil**, Rio de Janeiro, 21 mar. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-03/mais-da-metade-da-populacao-brasileira-vivem-no-litoral>. Acesso em: 15 fev. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ACESSO AQUAVIÁRIO. **Anuário Estatístico Portuário 2023**. Brasília, DF: ANTAQ, 2024. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt>. Acesso em: 06 abr.2024.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Engenharia Portuária**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMARAL, R. F. **Caracterização hidrossedimentológica do canal de acesso do complexo portuário do Maranhão**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ANDUTTA, F. P.; WANG, X. H.; LI, L.; WILLIAMS, D. Hydrodynamics and sediment transport in a macro-tidal estuary: Darwin Harbour, Australia. *In*: Wolanski, E. (ed.). **Estuaries of Australia in 2050 and Beyond**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 111-129.

BERGAMO, A. L.; MIRANDA, L. B.; CORRÊA, M. A. Estuário Programas para processamento e análise de dados hidrográficos e correntográficos. **Relat. Téc. Inst. Oceanogr.**, v. 49, p. 1-16, 2022.

BEZERRA, M. H. O.; ROSÁRIO, R. P.; ROLLNIC, M. Physical oceanographic behavior at the Guama/Acara-Moju and the Paracauari river mouths, Amazon Coast (Brazil). **Journal of Coastal Research**, n. 64, 2011.

BOWDEN, K. F. The mixing processes in a tidal estuary. **Air Water Pollut.**, v. 7, p. 343-356, 1963.

BRASIL. Comando da Marinha. **Normas da Autoridade Marítima para Obras e Atividades Afins em Águas Sob Jurisdição Brasileira: NORMAM 303**. Rio de Janeiro: DPC, 2023. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/atos-normativos/dpc/normam/normam-303.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.

BRASIL. Comando da Marinha. **Normas e Procedimentos para a Capitania dos Portos do Maranhão: NPCP-2020**. São Luís: CPMA, 2020. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/cpma/sites/www.marinha.mil.br.cpma/files/NPCP_2020_-_CPMA_0.pdf. Acesso em: 07 jan. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011. Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do § 3º do art. 37 e no § 2º do art. 216 da Constituição Federal. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF: Imprensa Nacional, 2011.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. Brasília, DF: 2017. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/manuais-de-custos-de-infraestrutura-de-transportes/volume-10-manuais-tecnicos/volume-10-manuais-tecnicos. Acesso em: 25 abr. 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Secretaria Nacional de Portos. **Plano Mestre do Complexo Portuário do Itaqui**. Santa Catarina: UFSC, 2018. Disponível em: https://www.emap.ma.gov.br/_files/arquivos/plano-mestre.pdf. Acesso em: 07 jan. 2022.

BRAY, R. N.; BATES, A. D.; LAND, J. M. **Dredging: A Handbook for Engineers**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 1996.

CARVALHO, K. L. V. **Correntes e massas de água no Complexo Estuarino de São Marcos e Plataforma Continental adjacente**. 2023. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

CASTIGLIA, M. C. C. P. **Disposição subaquática de rejeitos de dragagem: o caso do complexo lagunar de Jacarepaguá**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CAVALCANTE, G. H.; FEARY, D. A.; KJERFVE, B. Effects of Tidal Range Variability and Local Morphology on Hydrodynamic Behavior and Salinity Structure in the Caeté River Estuary, North Brazil. **International Journal of Oceanography**, p. 1-10, 2013.

CHAGAS, F. M. **Dinâmica de ondas de areia na Baía de São Marcos (Ponta da Madeira/MA): observações e modelagem numérica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DIAS, F.J.S. **Avaliação da descarga e geoquímica do material em suspensão no estuário do rio Jaguaribe - CE**. Departamento de Geologia. Monografia. Universidade Federal do Ceará. 107 f. 2005a.

DIAS, F.J.S.; MARINS, R.V.; MAIA L.P. Avaliação hidrodinâmica e tempo de residência no estuário do rio Jaguaribe - CE. In: **Anais/ Resumos da 57ª Reunião Anual da SBPC**, Fortaleza. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, São Paulo: <http://www.sbpnet.org.livro/57ra>. 2005b.

DIAS, F. J. S. **Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE)**. Dissertação. Universidade Federal do Ceará - UFC, Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará. 115f. 2007.

DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P. Hydrology of a well-mixed estuary at the semi-arid northeastern Brazilian coast. **Acta limnológica Brasiliensia**, v. 21, n. 4, p. 377-385, 2009.

DIAS F.J.S., CASTRO B.M., LACERDA L.D. Continental shelf water masses off the Jaguaribe River (4S), northeastern Brazil. *Continental Shelf Research*, Volume 66, p. 123-135. 2013.

DYER, K. R. **Coastal and estuarine sediment dynamics**. New Jersey: John Wiley and Sons: 1986.

EL-ROBRINI, M. H. S. *et al.* **Maranhão**. MMA Brasília, DF: MMA, 2011.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. **Plano de desenvolvimento e zoneamento do porto organizado do Itaqui**. São Luís: EMAP, 2019. Disponível em: <https://www.emap.ma.gov.br/pdf/pdz-itaqui.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2022.

FATEMA, K.; MAZNAH, W. O. W.; ISA, M. M. Spatial and temporal variation of physico-chemical parameters in the merbok estuary, Kedah, Malasia. **Tropical life sciences research**, v. 25, n. 2, p. 1-19, 2014.

FIGUEIREDO, A. R. **Análise da influência da corrente marítima na remoção dos sedimentos no Terminal Marítimo Ponta da Madeira em São Luís – MA**. 2018. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanalise**, v. 5, n. 6, p. 36-45, 1990.

FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar: a study of significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 27, n. 51, 1957.

GILBERT, E. R; CAMARGO, M. G.; SANDRINI-NETO, L. R. **Packag “rysgran”**: grain size analysis, textural classifications and distribution of unconsolidated sediments. 2015.

KJERFVE, B. Velocity averaging in estuaries characterized by a large tidal range to depth ratio. **Estuarine and Coastal Marine Science**, v. 3, n. 3, p. 311-323, 1975.

KJERFVE, B. Circulation and Salt Flux in a Well Mixed Estuary. *In*: KREEKE, J. V. **Physics of Shallow Estuaries and Bays**. New York: John Wiley and Sons, , 1986. p. 22-29. (Leature Notes on Coastal and Estuarine Studies; 16).

LIMA, H. P. **Circulação hidrodinâmica no Complexo Estuarino de São Marcos (MA – Brasil)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

LIMA, H. P.; DIAS, F. J. S.; TEIXEIRA, C. E. P.; GODOI, V. A.; TORRES JÚNIOR, A. R.; ARAÚJO, R. S. Implications of turbulence in a macrotidal estuary in northeastern Brazil – The São Marcos Estuarine Complex. **Regional Studies in Marine Science**, v. 47, p. 101947, 2021.

LIU, W. C.; HSU, M. H.; KUO, A. Y. Modelling of hydrodynamics and cohesive sediment transport in Tanshui River estuarine system, Taiwan. **Mar. Pollut. Bull.**, v. 44, p. 1076-1088, 2002.

Intergovernmental Oceanographic Commission. Scientific Committee on Oceanic Research. **The International thermodynamic equation of seawater – 2010**: calculation and use of thermodynamic properties. Paris: UNESCO, 2015.

MAGALHÃES, A. C. R. **Marés e correntes na otimização de manobras de navio na baía de São Marcos, São Luís – MA**. 2018. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. Aplicação do Diagrama T-S Estatístico-Volumétrico à Análise das Massas de Água da Plataforma Continental do Rio Grande do Sul. **Bol. Inst. Oceanogr.**, v. 28, n. 1, p. 185-200, 1979.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Edusp, 2002.

MONTEIRO, M. T. **Fitorremediação de rejeito contaminado proveniente do Canal do Fundão, na Baía de Guanabara-RJ**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MORAES, J. O. Processos de sedimentação na Baía de São Marcos, estado do Maranhão, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 17, n. 2, p. 153-164, 1977.

MORIN, J.; MORSE, J. W. Ammonium release from resuspended sediments in the Laguna Madre Estuary. **Mar. Chem.**, v. 65, p. 97-110, 1999.

PEJRUP, M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. *In*: BOER, P. L.; GELDER, A. V.; NIO, S. D. (ed.). **Tide influenced Sedimentary Environments and Facies**. Dordrecht: D. Reidel, 1988. p. 289-300.

PEREIRA, J. E. R.; HARARI, J. Modelo numérico tridimensional linear da plataforma continental do estado do Maranhão. **Bol. Inst. Oceanogr.**, v. 43, n. 1, p. 11-26, 1995.

SAMARITANO, L.; BERNARDINO, J. C. M.; SIEGLE, E.; TESSLER, M. G.; UEMURA, S. Hydrodynamic modeling over a sand wave field at São Marcos Bay, Brazil. *In*: VAN LANCKER, V.; GARLAN, T. (ed.). **VLIZ Special Publication**, n. 65. Bruges: Oostende, 2013. p. 241-247.

SANTOS, V. H. M. **Caracterização das condições oceanográficas em estuários de macromaré**: Complexo Estuarino Arraial – São José (MA). 2018. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

SANTOS, V. S. **Caracterização hidrodinâmica e fluxos de sedimentos em suspensão no complexo portuário de São Luís (MA) durante a atividade de dragagem**. 2018. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. **A practical handbook of sea water analysis**. 2. ed. Ottawa: Alger, 1972. (Bulletin Fisheries Research Board of Canada; 167).

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blucher/EDUSP: 1973.

THOMSON, R. E.; EMERY, W. J. **Data analysis methods in physical oceanography**. 3. ed. Cambridge, MA: Elsevier Science, 2014.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO MARANHÃO – UEMA. Núcleo de Geoprocessamento. **Bacias Hidrográficas e Climatologia no Maranhão**. São Luís: UEMA, 2016. Disponível em: <https://www.nugeo.uema.br/upnugeo/publicacoes/Bacias%20Hidrogr%C3%A1ficas%20e%20Climatologia%20-%20MA>. Acesso em: 26 out. 2023.

VALE S. A. **Agenda Ambiental**: Terminal Marítimo de Ponta da Madeira: TPM 2020. São Luís: Vale, 2021. Disponível em: <http://www.vale.com/PT/business/logistics/ports-terminals/Documents/pdf/Site-TMPM-Vale.pptx>. Acesso em: 07 jan. 2022.

WANG, X. H.; PINARDI, N. Modeling the dynamics of sediment transport and resuspension in the northern Adriatic Sea. **J. Geophys. Res.**, n. 107, 2002. DOI 10.1029/2001JC001303.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The Journal of Geology**, v. 30, p. 377-392, 1922.