Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente

Material Suplementar Ambiente Marinho

Tema: Modelagem

RT55/OUT 26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2026

EQUIPE TÉCNICA

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi (Coordenador)

Prof. Dra. Susana Beatriz Vinzón

Prof. Dr. Marcos Nicolás Gallo

Dra. Gabriela Verónica Buraschi

Dr. Gustavo Vaz de Melo

Dr. Marcelo Di Lello

Dr. Rafael Afonso do Nascimento Reis

Dra. Sabrina Aparecida Ramos da Fonseca

MSc. Diego Luiz Fonseca

MSc. Júlia Tavares Salviato

MSc. Tayná Rosa Martins Paiva

MSc. Thiago Fagundes Leão

Maria Júlia Veenings

Ronaldo Gabriel Medon

Thiago Campos Carlos

Dominique Joelle Silva

Evelyn Leite Santos

Lucas Oliveira

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 4

2 METODOLOGIA 4

2.1 COLETA 4

2.2 PROCESSAMENTO 6

2.2.1 Sensoriamento remoto 6

2.2.2 Modelagem numérica hidrodinâmica 6

2.2.3 Modelagem numérica de transporte de sedimentos 8

2.2.4 Estimativa da Deriva Litorânea 10

2.3 ANÁLISE 11

2.3.1 Dados *in situ* 11

2.3.2 Sensoriamento Remoto 12

2.3.3 Modelagem numérica 12

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 14

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 16

3.1 SALINIDADE NA SUPERFÍCIE DA COLUNA D'ÁGUA 17

3.2 TURBIDEZ/ CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NA COLUNA D'ÁGUA . 23

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 31

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 32

6 REFERÊNCIAS 32

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest-UFES) passaram por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atender aos objetivos do Programa. Estas alterações foram orientadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) e aprovadas pelo Comitê Interfederativo (CIF), por meio de: (1) Ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição), (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o "Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES" e (3) Ofício SEI Nº 32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, Nota Técnica nº 1/2024-CTBio/DIBIO/ICMBio e Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024.

As modificações implementadas encontram-se nos seguintes Materiais Suplementares, os quais contemplam todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES: 1) MS – Malha amostral, que apresentam as estações amostrais executadas ao longo do tempo por todos os Anexos/Temas, separados por cada marco temporal histórico mencionado acima ("Ano 1", "Transição", "Novo Ciclo" e "Deliberação 803"); 2) Frequência amostral, o qual contempla o histórico da periodicidade amostral (seguindo os mesmos Anexos/Temas contemplados no item 1) e 3) MS – Mapas históricos das malhas amostrais, que apresenta os mapas das malhas amostrais (incluindo as estações) executadas por todos os Anexos/Temas.

Segue o detalhamento temporal, como forma de esclarecer a execução dentro dos marcos históricos: "Ano 1" (setembro de 2018 e setembro de 2019); "Transição" (outubro de 2019 e julho de 2022); "Novo Ciclo" (agosto de 2022 a setembro de 2024) e "Deliberação 803" (outubro de 2024 a março de 2026). O grupo da Ecotoxicologia é uma exceção a esta historicidade, pois iniciou a amostragem referente ao "Novo Ciclo" em janeiro de 2023 e segue com a "Deliberação 803", na periodicidade já informada.

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia). Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest-UFES a fim de determinar os indicadores.

2.1 COLETA

A amostragem *in situ* é composta por dois conjuntos de dados: amostragens em pontos definidos pelas campanhas do Marinho Integrado, e amostragens que constituem séries temporais realizadas

em estações fixas (linhas de fundeio). Os perfis verticais de temperatura, salinidade (estimada a partir da condutividade), turbidez, fluorescência e oxigênio dissolvido foram obtidos por um equipamento do tipo CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) do modelo SBE 19plus V2 SeaCAT (*Sea Bird Electronics*) nas estações amostrais da malha do Marinho Integrado com frequência de amostragem trimestral. Esses dados passaram por um pré-processamento que envolve o auxílio do *software* disponibilizado pelo próprio fabricante do equipamento (SEA-BIRD ELECTRONICS, 2013) e o MATLAB® (*e.g.*, McTAGGART *et al.*, 2010). Assim, assegurou-se que os dados não apresentariam valores discrepantes e/ou descontinuidades nas análises posteriores. Por fim, foram estimadas outras propriedades oceanográficas a partir da temperatura, condutividade e pressão com o auxílio do pacote de rotinas *GSW Oceanographic Toolbox* desenvolvido por McDougall e Barker (2011).

Por outro lado, as séries temporais de medidas de parâmetros de ondas, correntes, temperatura, salinidade, fluorescência e turbidez foram obtidas durante a Transição em quatro linhas de fundeio: duas ao norte da foz do rio Doce e as outras duas ao sul. Cada linha de fundeio contemplou uma medição junto ao fundo (aproximadamente a 1 m do leito marinho) e outra próxima à superfície (aproximadamente 0,5 m de profundidade na coluna d'água) dos parâmetros físico-químicos provenientes de equipamentos CTD do modelo SBE HydroCAT-EP (*Sea Bird Electronics*). As medições de ondas foram realizadas a cada hora e as de correntes em intervalos de 20 min, ambas através de equipamentos ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) instalados próximos ao fundo. Os modelos dos ADCPs utilizados nas linhas de fundeio localizadas ao norte da foz foram o Signature1000 e Signature500 (Nortek Group), enquanto ao sul da foz do rio Doce o modelo utilizado foi o Signature500 (Nortek Group). Vale ressaltar que, para o Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES, as linhas de fundeio foram reduzidas para apenas duas ao norte da foz. Os dados foram extraídos mensalmente dos equipamentos através da realização de atividade embarcada de coleta e manutenção. Esses dados passaram por um pré-processamento que envolve o auxílio do *software* disponibilizado pelo próprio fabricante do equipamento (SignatureWaves64) e o MATLAB®, dos quais foram retirados os dados espúrios.

Além das amostragens previamente mencionadas, foi realizada uma campanha em dezembro de 2023, prevista no Plano de Trabalho como subsídio à modelagem numérica de transporte de sedimentos. Nesse campo foram realizadas amostragens de sedimentos de fundo na região que compreende a extensão do banco lamoso com o intuito de verificar as características do sedimento, quanto à sua granulometria e densidade, utilizando uma draga do tipo Van Veen, testemunho raso e um densímetro modelo *DensiTune* da marca STEMA.

Assim, os indicadores Salinidade superficial e Turbidez na coluna d'água são monitorados tanto nos perfis verticais como nas séries temporais dos fundeios. Neste novo ciclo está sendo realizado o processo de calibração dos turbidímetros com o intuito de transformar o sinal de turbidez em concentração de sedimento (massa/volume), tarefa realizada em laboratório com amostras de sedimentos coletadas no local dos fundeios.

2.2 PROCESSAMENTO

2.2.1 Sensoriamento remoto

Para essas análises foram selecionados dados diários obtidos pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), um a bordo do satélite Aqua e outro a bordo do satélite Terra (NASA, 2018). O processamento consistiu na conversão de arquivos nível 1A de processamento em nível 2 e posteriormente em nível 3, (L1A > L1B > L2 > L3b > L3m) utilizando o *software* SeaDAS, disponibilizado pela NASA. Nesse processamento foi aplicada a correção atmosférica, detecção de nuvens, o cálculo dos campos de concentração de clorofila-*a* ([chlor-*a*]) e a quantificação da temperatura da superfície do mar (TSM).

Os dados de [chlor-*a*] foram provenientes de uma análise mista das reflectâncias na banda do espectro correspondente ao vermelho, azul e verde. A camada superficial onde foi inferido esse dado pode variar de pouco menos de um metro em mares costeiros com alta turbidez a até mais de 30 metros em oceanos profundos de baixa turbidez (GORDON & McCLUNEY, 1975; SOUZA, 2005). Já a quantificação da TSM foi resultante da radiação emitida nos primeiros milímetros da coluna d'água (SOUZA, 2005).

O cálculo da turbidez superficial proposto por Dogliotti e outros (2015) foi feito com o *software* MATLAB®. Essa equação utilizou dados de reflexão da luz nos comprimentos de onda de 645 nm (banda da cor vermelha do espectro visível) e 859 nm (reflectância no comprimento de onda no infravermelho próximo) em ambientes marinhos de alta e baixa turbidez a uma distância mínima de 750 metros da costa com resolução espacial de 250 m (DOGLIOTTI *et al*., 2015; AURIN *et al*., 2013).

A presença de nuvens sobre o oceano durante a obtenção dos dados pelo satélite foi o principal limitante comum a todas as medidas realizadas com radiação refletida ou emitida impedindo, dessa forma, as suas quantificações.

Estes resultados subsidiaram a investigação dos eventos de aumento da turbidez superficial associados à maior descarga do rio Doce, assim como dos eventos de ressuspensão de sedimentos do fundo marinho, predominantemente induzidos pela dinâmica das ondas. Para tal, foram calculadas as frequências de ocorrência de turbidez superficial superior a 5 FNU e 2 FNU, respectivamente.

2.2.2 Modelagem numérica hidrodinâmica

O modelo ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) foi utilizado para evidenciar os processos costeiros ao longo da plataforma continental do Espírito Santo e oceano adjacente.

Dois domínios numéricos com distintas resoluções espaciais foram utilizados para as simulações hidrodinâmicas. No domínio de maior área (Grade 1), a resolução espacial implementada foi igual a 1/24° (aproximadamente 4,6 km), cobrindo a região entre 49° e 27°W e entre 8° e 27°S. Aninhada

à Grade 1, foi utilizada a técnica de *downscaling two-way* numa segunda grade (Grade 2), que apresentou resolução espacial de 1/120° (0,9 km). A Grade 2 abrangeu a plataforma continental do Espírito Santo entre o Banco de Abrolhos e o sul do Estado do Espírito Santo (41° e 36,4°W e 16,7° e 21,5°S).

Condições numéricas específicas foram aplicadas aos limites espaciais do modelo. A elevação da superfície foi parametrizada pela condição limite de Chapman (modo explícito) (CHAPMAN, 1985), enquanto as parametrizações *radiation/nudging* e Flather (2D momentum) (FLATHER, 1976) foram utilizadas para as componentes baroclínica e barotrópica, respectivamente. O modo *radiation* utilizado foi resolvido por Orlanski (1976) e Raymond e Kuo (1984) e reproduziu o fluxo de entrada e saída ao longo do contorno, bem como em diferentes profundidades da mesma localização horizontal. Um relaxamento para os traçadores climatológicos de temperatura e salinidade (T-S) foi aplicado em 5 dias no interior do domínio.

A difusão horizontal harmônica (10 m^2/s) foi utilizada para *momentum* e os traçadores (temperatura e salinidade). Os traçadores foram misturados ao longo das superfícies geopotenciais e o *momentum* foi misturado ao longo dos níveis sigma. Uma camada esponja para difusividade de 30 pontos de grade foi incluída nos limites abertos da Grade 1 e 2, enquanto o coeficiente de viscosidade horizontal foi mantido constante em todo o domínio (Ah = 50 m^2/s). A mistura turbulenta vertical foi parametrizada pelo modelo *Generic Length Scale* (GLS: k-kl) para os parâmetros de fechamento turbulento (WARNER *et al.*, 2005). A tensão de cisalhamento de fundo foi parametrizada segundo a lei quadrática de arrasto do fundo, com coeficiente de arrasto igual a Cd = 3×10^{-3}.

A discretização vertical adotada foi de 40 camadas sigma com a prescrição dos parâmetros de estiramento de superfície e fundo como 6,5 e 2,5, respectivamente. A batimetria foi obtida a partir da Carta Batimétrica Geral dos Oceanos (do inglês, *General Bathymetric Chart of the Oceans* - GEBCO) com resolução espacial de 30 segundos de arco (GEBCO, 2024). As condições de forçamento de superfície incluíram vento, umidade, pressão, temperatura do ar, precipitação e dados de radiação obtidos do ERA 5 - *Copernicus Climate Change Service* (C3S), quinta geração de reanálises atmosféricas de ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) (HERSBACH *et al.*, 2020), disponibilizados numa grade regular com resolução espacial de 0,25º e resolução temporal horária. A forçante de maré foi obtida do banco de dados global TPXO 9.0 (EGBERT & EROFEEVA, 2002), que fornece amplitudes e fases dos dez principais constituintes harmônicos de maré com resolução espacial de 1/4º, utilizados nos limites abertos das grades (M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f e M_m). Para as simulações realizadas entre os anos de 2018 e março de 2025 utilizaram-se as condições iniciais e diárias dos contornos (temperatura, salinidade, elevação e velocidades) fornecidas pelo *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM Global 1/12º, aproximadamente 9,5 km de resolução horizontal). Entretanto, para as simulações numéricas realizadas a partir de abril de 2025, foram utilizadas as condições iniciais e de contorno fornecidas pelo GLORYS12, uma reanálise global que apresenta 1/12° de resolução e se estende desde 1993 até o presente. O GLORYS12 é desenvolvido no âmbito do Serviço de Monitoramento do Ambiente

Marinho Copernicus (CMEMS) e baseia-se na plataforma de modelagem NEMO, forçada na superfície por condições atmosféricas provenientes da reanálise ERA-Interim do ECMWF. O sistema emprega assimilação de dados, assimilando conjuntamente dados de anomalias do nível do mar, temperatura da superfície do mar e concentração de gelo marinho, além de perfis verticais *in situ* de temperatura e salinidade.

2.2.3 Modelagem numérica de transporte de sedimentos

Para a simulação da hidro-morfodinâmica da plataforma continental e zona costeira foi utilizado o modelo numérico computacional DELFT3D (Delft3D-FLOW, 2023; Delft3D-WAVE, 2023). A grade do domínio modelado foi estruturada em coordenadas esféricas e apresentou como limite a borda da plataforma continental. A grade computacional é composta por 54.120 células com maior resolução espacial na região adjacente à foz do rio Doce, em torno de 130 m, enquanto para as demais áreas do domínio a resolução espacial foi em média de 450 m.

A batimetria implementada no modelo foi construída a partir da digitalização das cartas náuticas da Marinha do Brasil. Para a porção costeira do Espírito Santo, os dados foram digitalizados e gentilmente cedidos por Bastos *al.* (2015), enquanto para a região costeira localizada ao sul da Bahia digitalizou-se as cartas náuticas n° 22700, 1310, 1311 e 1312.

Em relação às forçantes hidrodinâmicas, considerou-se o efeito da maré, das ondas, do vento e da pressão atmosférica. Como condição de contorno de maré foram prescritas as 10 principais constantes harmônicas, sendo elas: M_2, S_2, N_2, K_2, O_1, K_1, Q_1, P_1, M_4, MN_4. As informações de fase e amplitude das constantes foram extraídas do modelo global FES2014 e interpoladas para os pontos nos contornos da grade computacional (CARRERE *et al.*, 2016; LYARD *et al.*, 2016).

As simulações das ondas de gravidade na plataforma continental interna e região costeira foram realizadas com o módulo de ondas do DELFT3D que, por sua vez, utiliza o modelo SWAN (Simulating WAves Nearshore). Para a modelagem das ondas foram utilizadas as condições de contorno produzidas por *Copernicus Climate Change Service* (C3S) do ECMWF. Os dados de altura significativa (Hs), período de pico (Tp) e direção média (Dir) de ondas, assim como os dados das componentes do vento e da pressão atmosférica, foram extraídos do ERA5/ECMWF (Hersbach *et al.*, 2020).

Em relação às parametrizações da viscosidade turbulenta horizontal e da tensão de atrito de fundo, adotou-se um valor constante do coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal (1 m^2/s) para o cálculo da mistura horizontal em todo o domínio modelado. Para o cálculo da tensão de atrito no fundo, utilizou-se a formulação de Chèzy, na qual também se considerou um valor constante para o coeficiente em todo o domínio (C = 65 $m^{1/2}/s$).

Para a integração dos resultados do transporte de sedimentos referentes aos períodos chuvosos investigados ao longo dos sete anos de execução do PMBA/Fest utilizou-se um modelo integrado na vertical (2DH). Os sedimentos finos modelados no Delft3D foram separados em 2 classes, sendo a primeira composta por sedimentos advindos do rio Doce e a segunda por sedimentos

ressuspensos dos depósitos lamosos presentes na plataforma continental interna. A série temporal horária do aporte de sedimentos do rio Doce utilizada nas simulações foi calculada pelo Tema Bacia de Integração (Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest-UFES) a partir da curva-chave de sedimentos em suspensão da estação fluviométrica P21 (Linhares-ES). A caracterização sedimentológica e o mapeamento dos depósitos lamosos da plataforma continental foram obtidos dos estudos de Bastos *e* outros (2015) e Vieira *e* outros (2019), assim como dos resultados das amostragens *in situ* realizadas em dezembro de 2023.

Considerando que o banco lamoso apresenta um alto teor de lama em toda a sua extensão, sendo este superior a 90% próximo à foz do rio Doce, a densidade considerada no modelo foi, aproximadamente, de 1600 kg/m³. A velocidade de queda adotada para os sedimentos finos foi de 0,147 mm/s, obtida a partir de ensaios laboratoriais realizados com sedimentos do banco lamoso, pelo Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Para a tensão crítica de cisalhamento (τ), utilizou-se o valor de 0,44 N/m², com base em dados experimentais obtidos por Bandeira *et al* (2025), a partir de amostras de lama da plataforma continental.

O transporte de sedimentos em suspensão foi calculado a partir da equação advectivo-difusiva do módulo (DELFT3D-FLOW, 2023). O coeficiente de mistura vertical adotado para o sedimento fino foi igual ao coeficiente de mistura de fluido vertical calculado pelo modelo (DELFT3D-FLOW, 2023). A erosão e deposição de sedimentos sobre o leito foram calculadas através da formulação de Partheniades-Krone (DELFT3D-FLOW, 2023). As validações das modelagens hidrodinâmica, de ondas e de transporte de sedimentos finos em suspensão foram realizadas através da comparação dos resultados das simulações e os dados coletados nas linhas de fundeio.

Especificamente para a análise do período seco do Ano 7 e chuvoso do ano 8, além do modelo 2DH, foi implementado um modelo tridimensional (3D) do DELFT3D-4, com discretização vertical em 15 camadas sigma. O modelo 3D foi forçado com as mesmas forçantes hidrodinâmicas aplicadas ao modelo 2DH. Além disso, foram impostas condições iniciais de contorno diárias de temperatura, salinidade elevação e velocidades fornecidas pelo GLORYS12 (CMEMS) descritas no item 2.2.2. O aporte fluvial foi prescrito com temperatura constante de 24°C.

Os resultados referentes às concentrações de sedimentos obtidos via modelo 2DH foram representados pela recorrência de 50% (mediana) de valores iguais ou maiores a 1 mg/l durante os sete períodos chuvosos investigados ao longo do período de execução do PMBA/Fest-UFES. Por outro lado, a partir do período chuvoso do Ano 7, o modelo 3D foi empregado para investigar os eventos de alta vazão do rio Doce e de passagem de sistemas frontais, bem como o período de realização das campanhas do Marinho Integrado.

Os resultados de transporte de sedimentos em suspensão oriundos do banco lamoso foram expressos em termos de média por duração do evento (dias ou semanas). A partir do período chuvoso do Ano 7, a pluma fluvial modelada do rio Doce foi representada considerando a primeira camada do modelo 3D (camada superficial), correspondente a 2% da coluna d'água e que está

associada à descarga fluvial sólida. O modelo 3D também permitiu observar o material sedimentar ressuspendido, visto que foram analisadas as concentrações de sedimentos finos da camada superficial, associadas aos depósitos lamosos localizados na plataforma continental interna. Adicionalmente, foram avaliadas as concentrações do material sedimentar colocado em ressuspensão próximo ao fundo (camada de fundo), correspondente à profundidade de 98% da coluna de água a partir da superfície. Visando melhor identificar os períodos de ressuspensão, também foi avaliada a série temporal de velocidades orbitais no fundo, oriunda da modelagem numérica de ondas.

2.2.4 Estimativa da Deriva Litorânea

Para estimar as vazões do transporte litorâneo geradas pelas correntes longitudinais devido à quebra das ondas, obedeceu-se a metodologia de Rodriguez e Mehta (2000). Para cada perfil do litoral (dimensão longitudinal, y) calculou-se a velocidade média das correntes litorâneas (V(y)) e a área de influência, definida pela largura da zona de surfe e a profundidade de quebra das ondas (d_b). Para a determinação de V(y) utilizou-se um modelo analítico-paramétrico com base nos trabalhos de Longuet-Higgins (1970a; 1970b). O modelo considerou o balanço entre forças de atrito (F_y), relacionadas às condições físicas da praia, tais como sedimento e declividade, e o gradiente, normal à praia, da componente tangencial da tensão de radiação (S_{xy}). Este último obtido a partir das condições de ondas na arrebentação. A partir deste balanço, foi estimada a distribuição da corrente litorânea na zona de surfe, com a forma do perfil de velocidade *cross-shore* (dimensão transversal, x) dependente do grau de difusão lateral considerado, o que permitiu representar a variação da velocidade tanto na zona *offshore* quanto *onshore*. Como indicado por Longuet-Higgins (1970a), o perfil de correntes linear pode ser modificado considerando o efeito de mistura lateral ou difusão devido à turbulência.

Os cálculos foram realizados em nove perfis de praia ao longo do litoral, sendo três ao sul da desembocadura do rio Doce e seis ao norte do rio Doce. Esses pontos são coincidentes com a localização dos perfis de praia monitorados pelo Tema Praias do Ambiente Costeiro (FEST, 2023). Os perfis S4 a S6 estão localizados ao sul da foz do rio Doce, enquanto os perfis N1 a N6 estão situados ao norte da foz do rio (Figura 2c). Os perfis de praia localizados mais ao sul (S1 a S3) não foram considerados nos cálculos da vazão litorânea, pois se encontram em região composta por terraços de abrasão, que controlam a incidência das ondas na praia e alteram, assim, a dinâmica de correntes no sistema praial. Nestes locais, uma parcela significativa da energia das ondas se dissipa quando estas se rompem nos afloramentos rochosos. As informações sobre as características da praia para cada perfil (azimute, diâmetro do grão (D_{90}) e declividade), foram obtidas dos levantamentos de campo realizados na região pelo Tema Praias do Ambiente Costeiro (RRDM, 2019a). Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos valores atualizados das variáveis mencionadas. Considerando um coeficiente de difusão máximo de 0,02 m^2/s (BOSBOOM & STIVE, 2012), foram calculados coeficientes de mistura (P) para os diferentes perfis de praia considerados, resultando um valor médio de 0,15, o que reduziu a velocidade máxima da corrente litorânea (V_{max}) em aproximadamente 40%.

Tabela 1: Valores dos parâmetros utilizados nas estimativas das vazões pela deriva litorânea.

Ponto	Azimute	D_{90} (m)	Declividade
S4	114,00	0,000871	0,03810
S5	138,43	0,001738	0,03333
S6	155,34	0,001738	0,03333
N1	110,80	0,001229	0,03500
N2	104,33	0,002457	0,05000
N3	82,39	0,004890	0,03333
N4	84,88	0,003990	0,04286
N5	88,90	0,005286	0,02308
N6	109,54	0,005286	0,02308

A altura e o ângulo de incidência das ondas, utilizados no cálculo da componente tangencial da tensão de radiação, foram extraídos dos resultados da modelagem numérica em cada perfil de praia para a profundidade de 10 m, aproximadamente. Logo, foi utilizada a teoria linear de ondas (CERC, 1984) para modificar a altura das ondas por empinamento e de direção por refração até a zona de quebra, considerando contornos batimétricos paralelos à linha de costa. Para determinar o índice e profundidade de quebra (h(y)) foram utilizadas formulações paramétricas (BATTJES & JANSSEN, 1978; KOMAR & GAUGHAN, 1973). A partir da declividade de cada perfil e a profundidade de quebra das ondas, determinou-se a largura da zona de surfe (B(y)). O produto da velocidade longitudinal e a área de influência para cada perfil possibilitou o cálculo ou estimativa das vazões de deriva litorânea, responsáveis pelo transporte de sedimentos ao longo do litoral.

2.3 ANÁLISE

2.3.1 Dados *in situ*

Os dados *in situ* obtidos pela perfilagem de CTD foram analisados por meio de seções horizontais e verticais e de mapas. Já os dados obtidos nos pontos de fundeio foram analisados tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, ressaltando as diferenças entre a circulação da superfície e do fundo e a comparação entre os dados obtidos para cada um dos pontos de fundeio. A compreensão da dinâmica local em diferentes escalas temporais permitiu definir os eventos hidrológicos e de aumento da energia das ondas que foram avaliados com a finalidade de caracterizar os principais processos físicos que atuaram na região da foz do rio Doce e adjacências.

Em relação aos dados de turbidez (NTU) obtidos pelos turbidímetros presentes nos fundeios F3 e F4, foram realizadas conversões do seu sinal em concentração de sedimento em suspensão (CSS - mg/l) utilizando a seguinte curva de calibração:

$$CSS = (0{,}644 \pm 0{,}033) \times NTU + 7{,}646 \pm 0{,}582$$

A curva foi construída com 2301 pares de amostras (concentração de sedimentos determinada em laboratório e sinal do turbidímetro). As amostras utilizadas foram aquelas coletadas pelos

mergulhadores durante as manutenções dos sistemas de fundeios e amostras coletadas pelo Marinho Integrado durante a realização das campanhas entre os anos de 2018 e 2025.

No intuito de analisar as variações da turbidez medidas nos fundeios (próximas ao fundo), foram realizadas comparações com a velocidade orbital gerada na propagação das ondas no ambiente marinho. À medida que a onda se propaga pelo oceano são gerados movimentos orbitais das partículas de água ao longo da coluna d'água, diminuindo seu diâmetro em direção ao fundo marinho e aumentando o deslocamento total durante o seu período até as regiões mais rasas. A velocidade orbital das partículas próximo ao fundo apresentou uma relação direta com a mobilização dos sedimentos, principalmente durante eventos com ondas de altura significativa acima de 1,5 m e/ou ondas de períodos longos (acima de 10 segundos).

2.3.2 Sensoriamento Remoto

Os dados diários de Clorofila-*a*, Temperatura da Superfície do Mar e as estimativas de Turbidez foram processados e mapeados para fornecer uma análise da variabilidade espaço-temporal da influência da descarga continental na produtividade primária, das feições térmicas que condicionaram a dispersão da pluma do rio Doce e da distribuição da turbidez superficial no oceano. Esta análise permitiu inferir a área de alcance da pluma de sedimentos do rio Doce diariamente e sazonalmente, bem como a dispersão dos sedimentos ressuspendidos do fundo com a passagem de sistemas transientes. Imagens de cor verdadeira diárias também foram utilizadas na identificação visual (qualitativa) da dispersão de sedimentos durante os eventos hidrológicos e de ressuspensão por ondas.

Para a filtragem inicial dos dados, foi analisada a região da desembocadura do rio Doce durante todo o período considerando as observações válidas, ou seja, descartando os dias que apresentaram uma presença de nuvem superior a 90% na região. A partir disso, o cálculo de recorrências (%) levou em consideração o número de vezes que a Turbidez foi igual ou ultrapassou um determinado limiar de FNU (2 e 5 FNU), dividido pelo número de observações totais válidas em cada um dos pontos amostrados. Dessa forma, os dados válidos representaram 45% do conjunto de dados referente aos sete períodos chuvosos do PMBA/Fest-UFES próximo à desembocadura do rio Doce.

2.3.3 Modelagem numérica

Mapas dos campos termohalinos e de velocidades resultantes dos experimentos numéricos hidrodinâmicos foram confeccionados a fim de compreender eventos específicos (instantâneos) e padrões anuais (medidas estatísticas). A modelagem numérica hidrodinâmica visou o entendimento sinóptico das diferentes condicionantes ambientais existentes na plataforma continental que conferem alterações em diferentes escalas de tempo no espalhamento da pluma proveniente do rio Doce no ambiente marinho. Para a determinação da pluma de baixa salinidade oriunda do rio Doce no ambiente marinho, considerou-se o valor de salinidade superficial igual ou inferior a 35, uma vez que este representa o limite adotado por Pereira e colaboradores (2005) como representativo de

Água Costeira (AC). A AC é a massa d'água originada a partir da diluição da água oceânica pela água dos rios aportada na plataforma continental. A partir dos resultados de simulações numéricas para os diferentes períodos chuvosos, foram calculadas as recorrências da pluma de baixa salinidade sobre a plataforma continental para os diferentes períodos chuvosos, isto é, foram contabilizados o número de dias em que os valores de salinidade superficial estiveram dentro do limite supracitado. Deste modo, foram calculadas as frequências de recorrência (%) da pluma de baixa salinidade sobre a plataforma continental e as áreas de abrangência da pluma no Ambiente Marinho foram determinadas com isolinhas correspondentes aos valores de recorrência superiores a 10%.

As comparações entre os resultados das simulações numéricas do transporte de sedimentos com os dados de turbidez coletados, foram apresentadas tanto de modo pontual, na forma de séries temporais, quanto regional, na forma de mapas, permitindo a visualização da variação espaço-temporal desse indicador. As séries temporais foram obtidas para os locais relevantes, como nos pontos onde foram realizadas as medições *in situ* (fundeios), assim como em locais importantes para a descrição dos processos apontados. Os mapas foram selecionados de forma a ilustrar eventos específicos ou períodos de interesse (como os períodos chuvosos de cada ano ou as datas das campanhas). A modelagem numérica do transporte de sedimentos permitiu compreender a dispersão da descarga sedimentar proveniente do rio Doce e/ou de sedimentos que já estavam depositados na plataforma continental adjacente, a fim de identificar o destino do Material Ligado ao Desastre (MLD) no ambiente marinho. O foco dessa modelagem foi analisar os papéis dos diferentes processos hidrodinâmicos específicos para o transporte de sedimentos finos, como por exemplo tensões de cisalhamento no fundo, velocidades orbitais, correntes residuais de maré, ondas, entre outros. O cálculo da deriva litorânea permitiu evidenciar sua importância frente a outras correntes residuais, permitindo comparações interanuais e em cenários específicos, mostrados através de mapas de estimativas de vazões de deriva (residuais para os períodos chuvosos analisados).

Na análise das vazões litorâneas foram calculados valores médios (ou residuais) e levadas em consideração informações estatísticas como a amplitude dos valores médios para cada período chuvoso e o valor médio para cada ano. Desta forma, os resultados foram apresentados como a amplitude de variação deste processo, podendo ser feitas inferências sobre a direção preferencial da vazão litorânea na escala de tempo considerada. Cabe ressaltar que a vazão litorânea, uma medida da capacidade de transporte pela deriva, resulta da dinâmica de correntes originadas dentro da zona de surfe e que a mesma responde imediatamente às modificações do clima de ondas. Ou seja, ainda que as estatísticas demonstrem um sentido e intensidade preferencial, a corrente litorânea apresenta variações ao longo do tempo.

Para quantificar a importância da vazão litorânea, no período chuvoso do Ano 7 foram construídas as séries de vazão de deriva, normalizada pela vazão do rio Doce (analisada em termos percentuais), e comparada sua predominância (para o sul ou para o norte) com atuação do vento.

Para a caracterização dos períodos secos e chuvosos e identificação de eventos mais destacados de ressuspensão de sedimentos no banco lamoso foi calculada a potência de ondas, que considera a influência, tanto da altura significativa, quanto do período de pico das ondas, conforme a equação a seguir: $P = Hs^2 Tp/2$.

- DADOS COMPLEMENTARES

Para o desenvolvimento dos produtos do Tema Modelagem, foram utilizadas as séries temporais de vazão (m^3/s) medidas na estação P21 (40,06°O e 19,41°S), e de descarga de sólidos em suspensão do rio Doce (QSS; t/d), referentes a todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES, disponibilizadas pelo Tema Integração Flúvio-Estuarina do Ambiente Dulcícola.

Também foram utilizados dados de Turbidez (NTU) e salinidade medidos na estação automática RDO-16 Boia (39,82°O e 19,64ºS, Linhares - ES) pelo Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos da Fundação Renova (PMQQS), assim como dados de salinidade e turbidez da boia ES-1 (39,46°O e 19,41°S) sob responsabilidade do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta).

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Ao longo da evolução do PMBA/Fest-UFES a modelagem numérica biogeoquímica prevista no primeiro Plano de Trabalho foi realizada e apresentada no RA2019 para avaliar o impacto do MLD na porção biológica, geológica e química do ambiente marinho. Na ocasião, foi apresentada a distribuição do sedimento superficial e de fundo associados à vazão do rio Doce simulada pelo modelo *Surface-Trapped River Plume Evolution* (STRiPE) (OSADCHIEV & ZAVIALOV, 2013), bem como a distribuição dos parâmetros biogeoquímicos sobre a plataforma continental simulada pelo modelo biogeoquímico *Eastern Boundary Upwelling Systems* (BioEBUS) (GUTKNECHT *et al*., 2013). Além disso, os resultados simulados de nutrientes (nitrato e amônio), campos de fitoplâncton e zooplâncton, campos de clorofila-*a* e oxigênio dissolvido foram entregues via *Dropbox* e o mapa da distribuição de sedimento de fundo foi apresentado em RRDM (2019b). A partir do período de Transição, essa metodologia foi alterada para a modelagem numérica de transporte de sedimentos que permitiu a análise da dinâmica dos sedimentos finos na plataforma continental adjacente associada aos processos de dispersão e ressuspensão (maré, vento local, ondas), além da descarga sólida do rio Doce. Após o RA2024, a modelagem numérica de transporte de sedimentos foi implementada na versão tridimensional, com os primeiros resultados apresentados a partir do relatório para o período chuvoso do Ano 7. Cabe ressaltar, que a partir do período seco do Ano 7 foi implementada uma nova velocidade de queda dos sedimentos finos provenientes do banco lamoso e tensão crítica (0,147 mm/s e 0,44 N/m^2). Passou-se a considerar também os resultados dos modelos de ondas para a deriva litorânea, utilizando tanto modelos paramétricos quanto para cenários específicos com acoplamento do modelo de sedimentos. É importante salientar que,

mesmo havendo alterações metodológicas, a meta foi alcançada em conjunto com os demais Temas que compõem o Ambiente Marinho.

No intuito de aprimorar a representação das condições ambientais pelo modelo hidrodinâmico, os dados de reanálise do GLORYS passaram a ser utilizados como condições de contorno, em substituição aos dados do HYCOM empregados anteriormente. Essa adaptação justifica-se pelo fato de os dados do GLORYS incorporarem a assimilação de observações de nível do mar, temperatura e salinidade obtidas por satélites e medições *in situ*, contribuindo para uma representação mais consistente da variabilidade oceânica na região.

Embora essa adaptação possa produzir diferenças quantitativas entre as simulações, não foram identificadas alterações nos padrões hidrodinâmicos predominantes observados ao longo do monitoramento. Desse modo, destaca-se que a adaptação realizada representa apenas um aprimoramento técnico das condições de contorno. Ressalta-se, ainda, que as simulações permanecem submetidas aos mesmos procedimentos de calibração, validação e avaliação de desempenho utilizados durante todo o monitoramento.

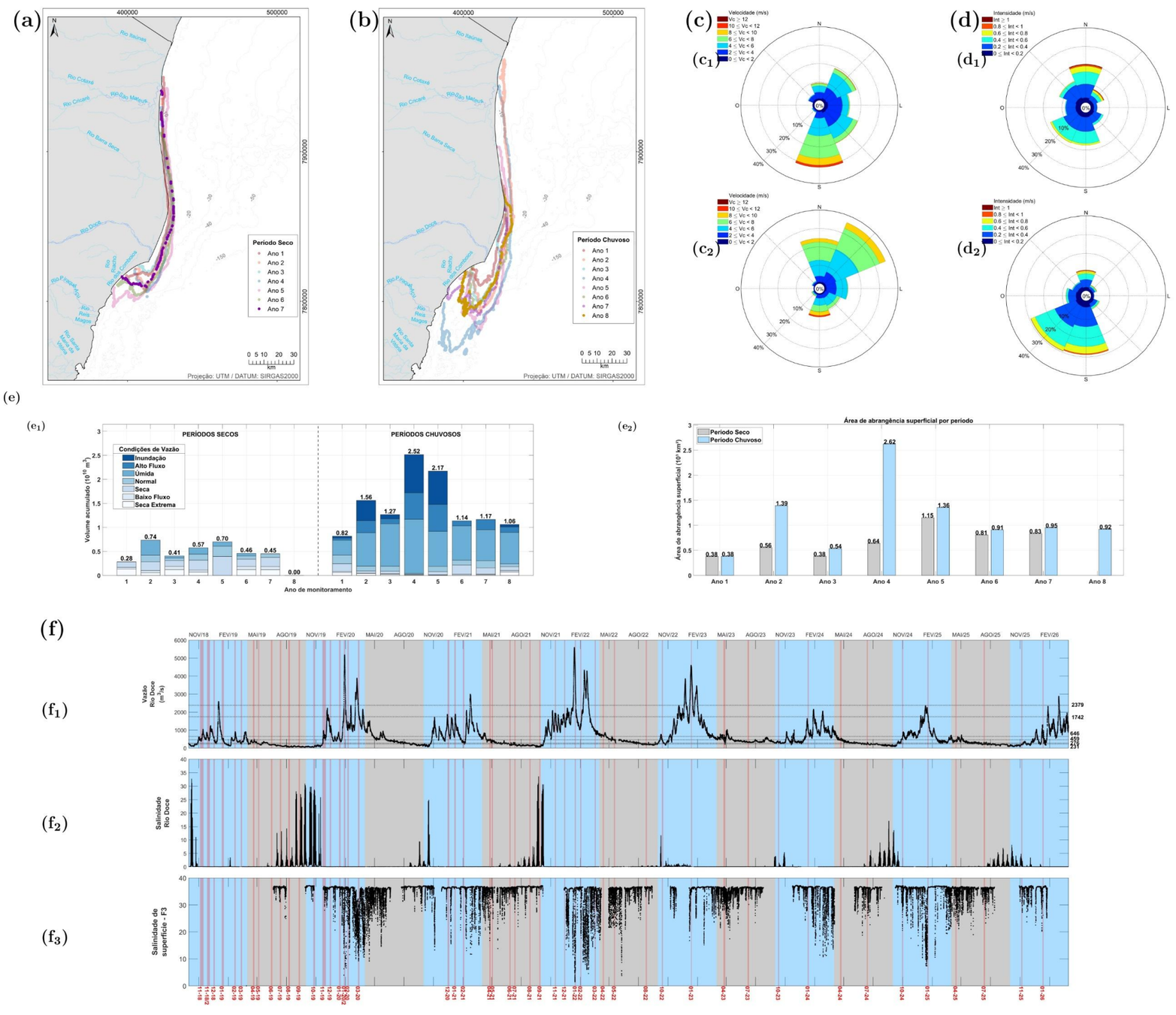
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

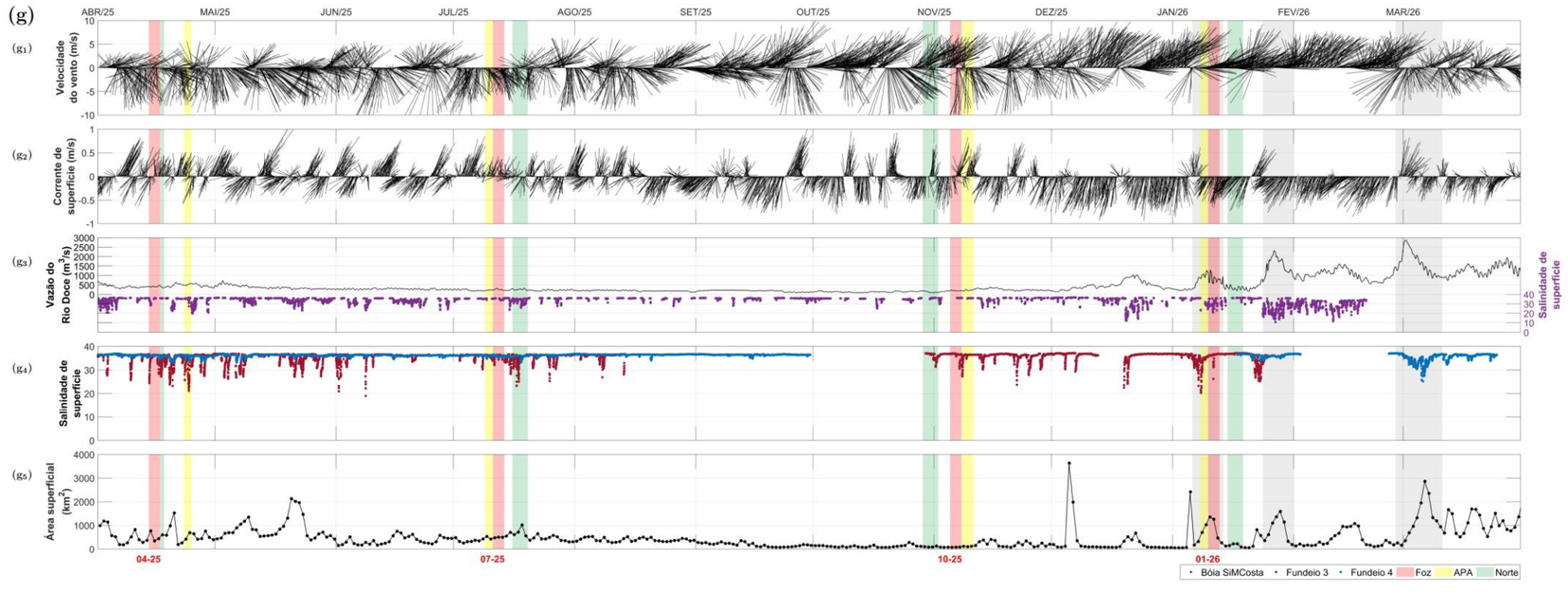
Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest-UFES e obtidos ao longo de todo monitoramento na área ambiental I. Vale ressaltar que os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao Rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

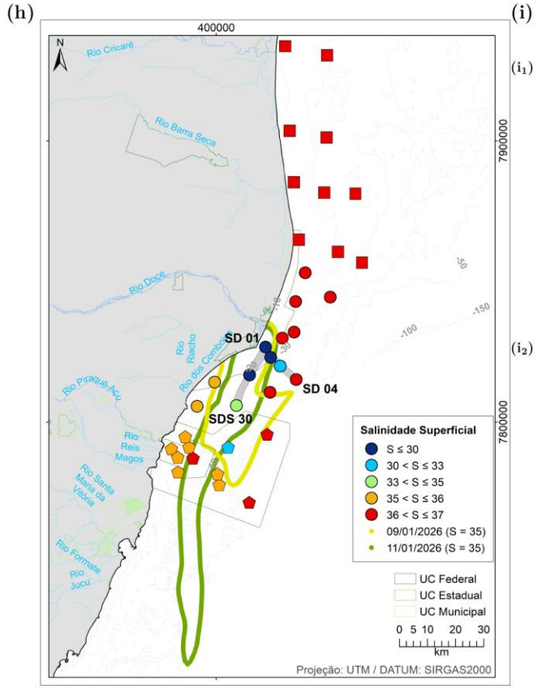
Os indicadores do PMBA/Fest-UFES vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva.

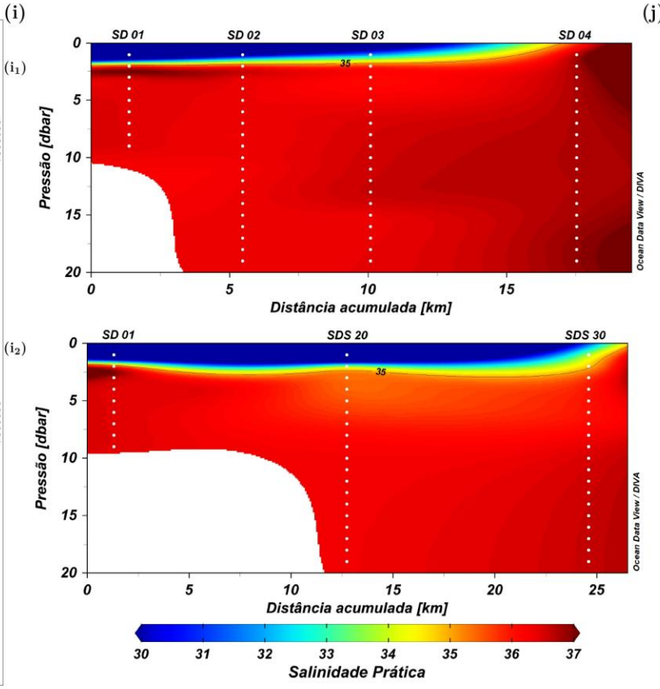
3.1 SALINIDADE NA SUPERFÍCIE DA COLUNA D'ÁGUA

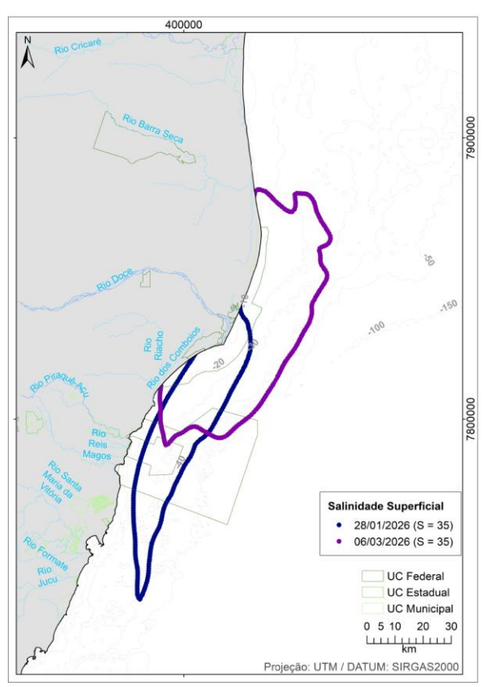
Figura 1: Salinidade na superfície da coluna d'água.




(g)
ABR/25
MAI/25
JUN/25
JUL/25
AGO/25
SET/25
OUT/25
NOV/25
DEZ/25
JAN/26
FEV/26
MAR/26
(g1)
Velocidade do vento (m/s)
(g2)
Corrente de superfície (m/s)
(g3)
Vazão do Rio Doce (m³/s)
Salinidade de superfície
(g4)
Salinidade de superfície
(g5)
Área superficial (km²)
04-25
07-25
10-25
01-26
Bóia SiMCosta
Fundeio 3
Fundeio 4
Foz
APA
Norte


(h)
400000
7900000
7800000
Rio Cricaré
Rio Barra Seca
Rio Doce
Rio Riacho
Rio dos Cortinhos
Rio Piraque-Açu
Rio Reis Magos
Rio Santa Maria da Vitória
Rio Formate
Rio Jucu
SD 01
SD 04
SDS 30
Salinidade Superficial
S ≤ 30
30 < S ≤ 33
33 < S ≤ 35
35 < S ≤ 36
36 < S ≤ 37
09/01/2026 (S = 35)
11/01/2026 (S = 35)
UC Federal
UC Estadual
UC Municipal
0 5 10 20 30
km
Projeção: UTM / DATUM: SIRGAS2000


(i)
(i1)
SD 01
SD 02
SD 03
SD 04
Pressão [dbar]
Distância acumulada [km]
Ocean Data View / DIVA
(i2)
SD 01
SDS 20
SDS 30
Pressão [dbar]
Distância acumulada [km]
Ocean Data View / DIVA
30 31 32 33 34 35 36 37
Salinidade Prática


(j)
400000
7900000
7800000
Rio Cricaré
Rio Barra Seca
Rio Doce
Rio Riacho
Rio dos Cortinhos
Rio Piraque-Açu
Rio Reis Magos
Rio Santa Maria da Vitória
Rio Formate
Rio Jucu
Salinidade Superficial
28/01/2026 (S = 35)
06/03/2026 (S = 35)
UC Federal
UC Estadual
UC Municipal
0 5 10 20 30
km
Projeção: UTM / DATUM: SIRGAS2000

Distribuição espaço-temporal da salinidade superficial na plataforma continental próximo à desembocadura do rio Doce, abrangendo o período de realização do PMBA/Fest-UFES, de outubro de 2018 a março de 2026: a. Áreas de recorrência superiores a 10% dos valores de salinidade ≤ 35 determinadas a partir dos resultados obtidos através de simulações numéricas para cada um dos sete períodos secos investigados durante o PMBA/Fest-UFES. A isolinha sólida em roxo representa a delimitação da área de recorrência relativa ao período seco do Ano 7, enquanto as demais isolinhas indicam as áreas de recorrência dos seis períodos secos investigados anteriormente. **b.** Áreas de recorrência superiores a 10% dos valores de salinidade ≤ 35 determinadas a partir dos resultados obtidos através de simulações numéricas para cada um dos oito períodos chuvosos investigados durante o PMBA/Fest-UFES. A isolinha sólida em amarelo representa a delimitação da área de recorrência relativa ao período chuvoso do Ano 8, enquanto as demais isolinhas indicam as áreas de recorrência dos sete períodos chuvosos investigados previamente. **c.** Rosa direcional dos ventos para todos os sete períodos secos **(c_1)** e oito chuvosos **(c_2)** investigados no período de execução do PMBA/Fest-UFES no Fundeio 3. **d.** Rosa direcional das correntes superficiais (3 m de profundidade) para todos os sete períodos secos **(d_1)** e oito chuvosos **(d_2)** investigados no período de execução do PMBA/Fest-UFES no Fundeio 3. **e. (e_1)** Volume acumulado de água aportado pelo rio Doce para a plataforma continental durante os períodos secos e chuvosos investigados durante o monitoramento. As barras empilhadas representam a contribuição das diferentes condições de vazão, conforme o critério proposto por Oliveira e Quaresma (2017), e os valores acima das barras indicam o volume total acumulado em cada período. **(e_2)** Áreas de abrangência da pluma de baixa salinidade, definidas pela recorrência superior a 10% da salinidade superficial ≤ 35, durante os períodos secos e chuvosos monitorados no âmbito do PMBA/FEST-UFES. **f.** Séries temporais referentes ao período de execução do PMBA/Fest-UFES (outubro/2018 a março/2026). As faixas verticais vermelhas destacam os períodos de realização das campanhas para coleta de dados *in situ* do Ambiente Marinho no Setor Foz. As áreas azuis e cinzas indicam os períodos chuvosos e secos, respectivamente. **(f_1)** Variação horária de vazão do rio Doce (m³/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola. As linhas pontilhadas horizontais indicam os limites que estabelecem as condições de vazão de acordo com Oliveira e Quaresma (2017), em ordem crescente: Seca Extrema, Baixo Fluxo, Seca, Normal, Úmida, Alto Fluxo e Inundação. **(f_2)** Variação horária da salinidade do rio Doce observada na estação RDO16 (Linhares - ES) do Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS). **(f_3)** Variação temporal da salinidade superficial medida a cada 20 minutos no Fundeio 3, localizado no Setor Foz Norte. As lacunas nas séries temporais indicam ausência de dados. **g.** Séries temporais referentes aos três eventos de alta vazão do período chuvoso do Ano 8 do PMBA/Fest-UFES (janeiro/2026 a março/2026) destacados nesse relatório (faixas verticais cinzas), abrangendo a campanha 01-26 do Marinho Integrado. Os períodos de realização das campanhas de coleta de dados *in situ* são destacados pelas faixas verticais vermelha (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verde (Setor Norte). **(g_1)** Variação horária do vento (m/s, notação meteorológica – Norte positivo, Sul negativo) provenientes da reanálise do ECMWF/ERA5 para o ponto 39,75°O e 19,75°S; **(g_2)** Variação temporal da corrente superficial medida no ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3) **(g_3)** Variação horária de vazão do rio Doce (m³/s) medida

na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola (em preto) e da salinidade medida no ponto da boia do SiMCosta ES-1 (39,46°O e 19,41°S; em roxo). As lacunas nas séries temporais indicam ausência de dados. **(g_4)** Variação temporal da salinidade superficial medida nos pontos de fundeio localizados no Subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3) e Setor Norte (em azul – Fundeio 4). As lacunas nas séries temporais indicam ausência de dados. **(g_5)** Variação temporal da área superficial da pluma de baixa salinidade formada pelo aporte fluvial do rio Doce no ambiente marinho, definida pela recorrência superior a 10% da salinidade superficial ≤ 35 a partir dos resultados de simulações numéricas. **h.** Isohalinas superficiais médias diárias (S = 35) obtidas por simulação numérica para os dias 09 (amarela) e 11 (verde) de janeiro de 2026, quando estavam sendo realizadas as coletas nos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e Foz, respectivamente. Os símbolos em escala de cores correspondem às medições instantâneas de salinidade superficial realizadas durante a campanha 01-26 do Marinho Integrado. Os círculos correspondem às medições realizadas no Setor Foz, os pentágonos no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e os quadrados no Setor Norte. **i**. Seções de salinidade prática obtidas via perfilagem de CTD na campanha 01-26 do Marinho Integrado. **(i_1)** transecto no setor Foz Central com início no ponto SD 01 e final no ponto SD 04 medidos no dia 11 de janeiro de 2026 (gráfico superior) e **(i_2)** transecto no setor Foz Sul com início no ponto SD 01 e final no ponto SDS 30 medidos no dia 10 de janeiro de 2026 (gráfico inferior), ambos indicados pelos transectos sombreados em cinza na Figura 1h. **j.** Isohalinas superficiais médias diárias (S = 35) obtidas por simulação numérica para os dias 28 de janeiro de 2026 (azul) e 06 de março de 2026 (roxo), quando ocorreram as máximas áreas da pluma de baixa salinidade do rio Doce associadas aos eventos de Alto Fluxo e Inundação, respectivamente.

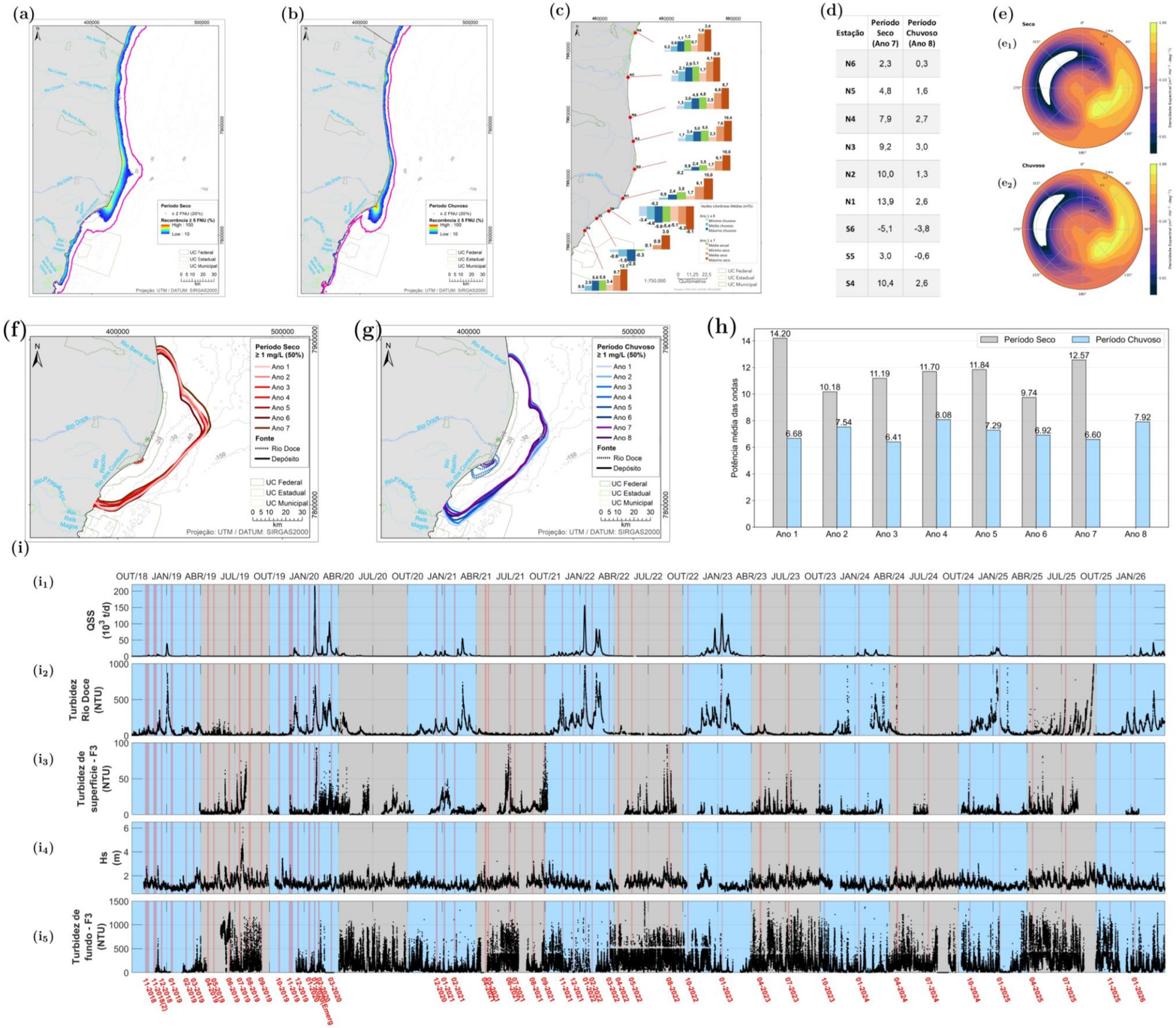
A salinidade superficial é um indicador indireto de áreas potencialmente impactadas pela parte dissolvida do MLD, disponibilizado no ambiente marinho a partir do Rompimento da Barragem de Fundão (Mariana, MG). Este indicador está associado ao aporte fluvial proveniente do rio Doce na plataforma continental, permitindo a compreensão da dinâmica da dispersão da pluma de baixa salinidade (salinidade ≤ 35) e, consequentemente, do MLD no ecossistema marinho. Para os diferentes períodos secos e chuvosos monitorados durante o PMBA/Fest-UFES, foram estimadas as áreas do ambiente marinho sob influência do aporte proveniente do rio Doce que se estenderam tanto ao norte quanto ao sul da foz (Figura 1a e Figura 1b), em consequência das condições meteoceanográficas e do volume total das águas fluviais destinados à plataforma continental (Figura 1e$_1$). De modo geral, inversões na direção dos ventos (S-SE), mais frequentemente observadas durante os períodos secos (Figura 1c$_1$) em consequência da passagem de sistemas frontais, são acompanhadas de mudanças na direção das correntes superficiais (NO-N) (Figura 1d$_1$), resultando em menores valores de salinidade superficial nos setores Foz Central, Foz Norte e Setor Norte (Figura 1a). Por outro lado, nos períodos quando houve o predomínio de ventos N-NE (Figura 1c$_2$) e, consequentemente, correntes SO-S (Figura 1d$_2$), foram observadas reduções na salinidade superficial nos setores Foz Central, Foz Sul e APA Costa das Algas (Figura 1b). Este comportamento é mais frequentemente observado durante os períodos chuvosos (Figura 1c$_2$ e Figura 1d$_2$). Entre os períodos secos dos Anos 6 e 7 não foram observadas diferenças significativas (<0,05%) nas áreas de recorrência da água com salinidade

superficial inferior ou igual a 35 (Figura 1a). De forma semelhante, os volumes de água provenientes do rio Doce que alcançaram a plataforma continental também apresentaram valores comparáveis entre os dois períodos, em torno de $0{,}45\times10^{10}$ m³ (Figura 1e$_1$). No mesmo período foram observadas ocorrências das condições de vazão Seca Extrema e Baixo Fluxo, em contraste com o período seco do Ano 5, quando as vazões permaneceram acima de 276,4 m³/s (Figura 1f$_1$). Como consequência, o Ano 5 apresentou predomínio da condição Seca de vazão durante cerca de 66,7% do período seco, refletindo em uma área de recorrência da pluma de baixa salinidade próxima de $1{,}15 \times 10^3$ km², superior àquela observada nos períodos secos dos Anos 6 e 7 (Figura 1e$_2$). Particularmente no período seco do Ano 7, foi observada a segunda maior área de recorrência da pluma de baixa salinidade no ambiente marinho (~835 km²) (Figura 1e$_2$). Apesar desta expressiva abrangência espacial, o volume de água doce aportado à plataforma continental ($0{,}45\times10^{10}$ m³) foi superior apenas aos registrados nos períodos secos dos Anos 1 e 3 (Figura 1e$_1$), evidenciando que a abrangência da pluma respondeu a outras condições além do aporte fluvial. Esse padrão foi associado às condições meteorológicas predominantes, caracterizadas pela maior frequência de ventos intensos de leste e de ventos do quadrante sul durante os eventos de inversão (Figura 2Figura 1**g$_1$**), que favoreceram a advecção das águas de baixa salinidade para a região marinha localizada ao norte da foz do rio Doce. Em relação aos períodos chuvosos, entre os Anos 6, 7 e 8 observou-se comportamentos semelhantes de recorrência da pluma de baixa salinidade (S ≤ 35), sem diferenças significativas tanto na área total quanto na sua distribuição espacial sobre a plataforma continental (Figura 1b e Figura 1e$_2$). As variações observadas foram inferiores a 1%, refletindo a similaridade dos volumes de água do rio Doce aportados ao ambiente marinho (~1×10^{10} m³) e das frequências de ocorrência da alta vazão (42% a 49%), que engloba as condições Úmida, Alto Fluxo e Inundação (Figura 1e$_1$). Nos períodos seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8 foram realizadas quatro campanhas do Marinho Integrado. Nas campanhas 04-25 e 07-25 realizadas no período seco as vazões variaram entre 195,8 m³/s e 643,7 m³/s (Figura 1f$_1$), limitando a influência das águas fluviais à desembocadura do rio Doce. Durante a primeira campanha realizada no período chuvoso do Ano 8 (11-25), a descarga do rio variou entre 88,7 m³/s e 269,4 m³/s, indicando que a condição de vazão variou entre Seca Extrema e Baixa Vazão (Figura 1f$_1$). Entretanto, na campanha 01-26 foram observados baixos valores de salinidade nos setores APA Costa das Algas e Foz (Figura 1h, Figura 1i$_1$ e Figura 1i$_2$) em virtude da advecção da pluma de baixa salinidade para a porção sul da foz do rio Doce em consequência do comportamento das correntes superficiais impostas pela atuação de ventos predominantes E-NE (Figura 1g$_1$). Destaca-se que neste período a vazão do rio Doce estava na condição Úmida (> 646 m³/s), de modo que reduzidos valores de salinidade (mínimo de 20) também foram registrados a cerca de 6 km da foz do rio Doce no dia 08 de janeiro pela Bóia do SIMCosta (39,46°O e 19,41°S) (Figura 1g$_3$). Durante o mês de janeiro de 2026, a vazão do rio Doce também atingiu a condição de Alto Fluxo (>1.742 m³/s) no dia 26 e, permaneceu nesta condição por cerca de dois dias, de modo que valores de 10,7 de salinidade também foram registrados no dia 27 pela Bóia do SiMCosta (39,46°O e 19,41°S) (Figura 1g$_3$). Neste período os ventos NE foram predominantes, exceto dos dias 28 e 29 de janeiro de 2026, quando foram registradas predominância de ventos E, e aumento de suas intensidades (Figura 1g$_1$). Apesar da influência que exercem no campo de correntes superficiais, as inversões de ventos acima mencionadas não foram capazes de alterar a

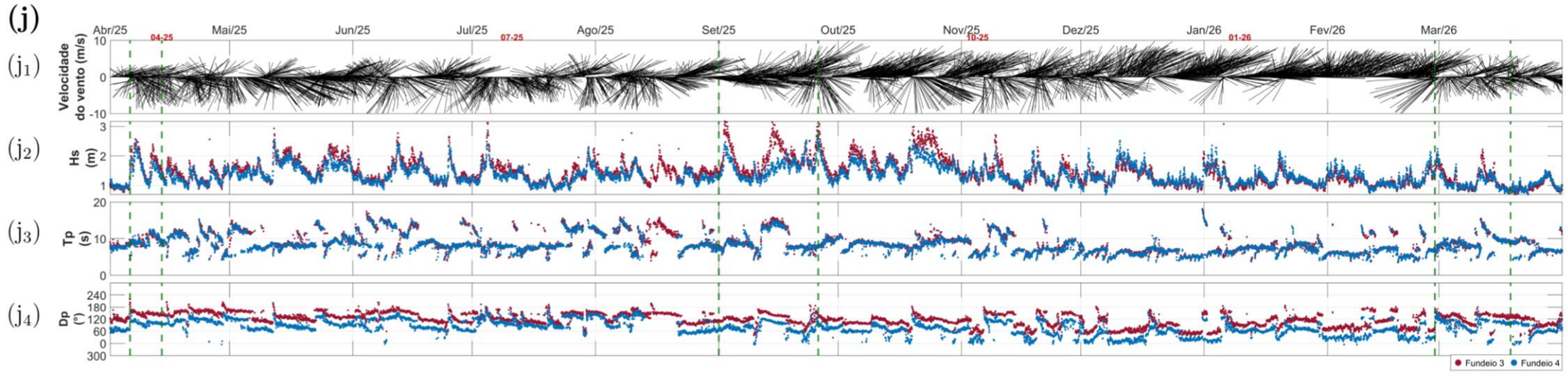
direção das correntes que se mantiveram preferencialmente S-SO até o dia 31 de janeiro (Figura 1g$_2$). No período analisado, as águas provenientes do rio Doce foram transportadas por 95 km para sul, ultrapassando os limites da APA Costas das Algas (Figura 1j). No final do período chuvoso do Ano 8, a vazão do rio Doce atingiu a cota de inundação (> 2.379 m^3/s) em 28 de fevereiro, condição que não foi observada nos períodos chuvosos dos anos 6 e 7 (Figura 1f$_1$). Após a ocorrência do pico de vazão (2.881 m^3/s), registrado em 01 de março, foram observadas altas vazões do rio Doce até o dia 31 de março (Figura 1g$_3$). Quando foi registrado o pico de inundação e nos cinco dias subsequentes, houve a atuação predominante de ventos SO-S-SE na plataforma continental (Figura 1g$_1$), favorecendo a advecção de águas provenientes da descarga do rio Doce fossem para a porção da plataforma continental localizada ao norte da foz. A partir do dia 06 de março, quando foram registrados ventos N-NE (Figura 1g$_1$), a pluma de baixa salinidade passou a ser advectada para região localizada ao sul da foz do rio Doce. Essas mudanças na direção dos ventos favoreceu o aumento da área de abrangência da pluma do rio Doce no ambiente marinho, que variou de 159 a 2.865 km² entre os dias 28 de fevereiro e 06 de março (Figura 1g$_5$), e consequentemente, ampliou área do ambiente marinho sob influência do MLD (Figura 1j).

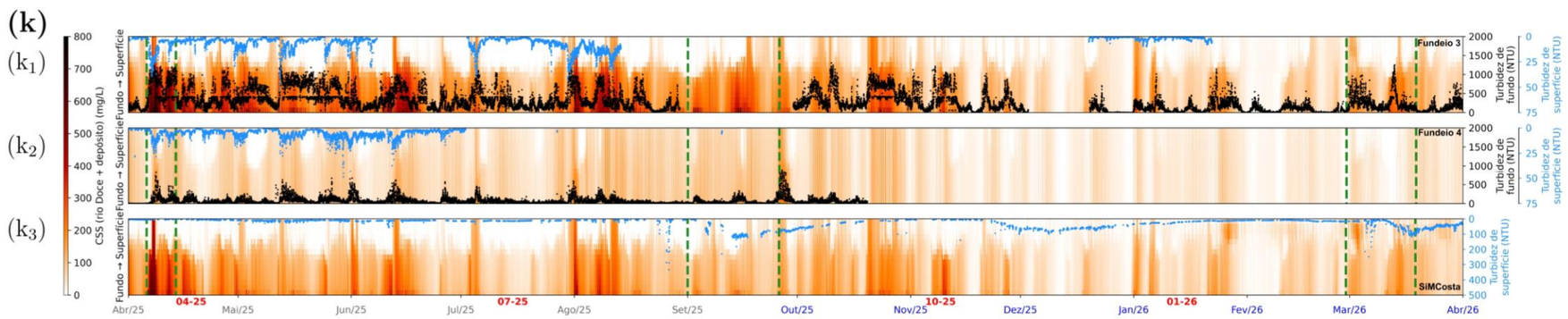
3.2 TURBIDEZ/ CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NA COLUNA D'ÁGUA

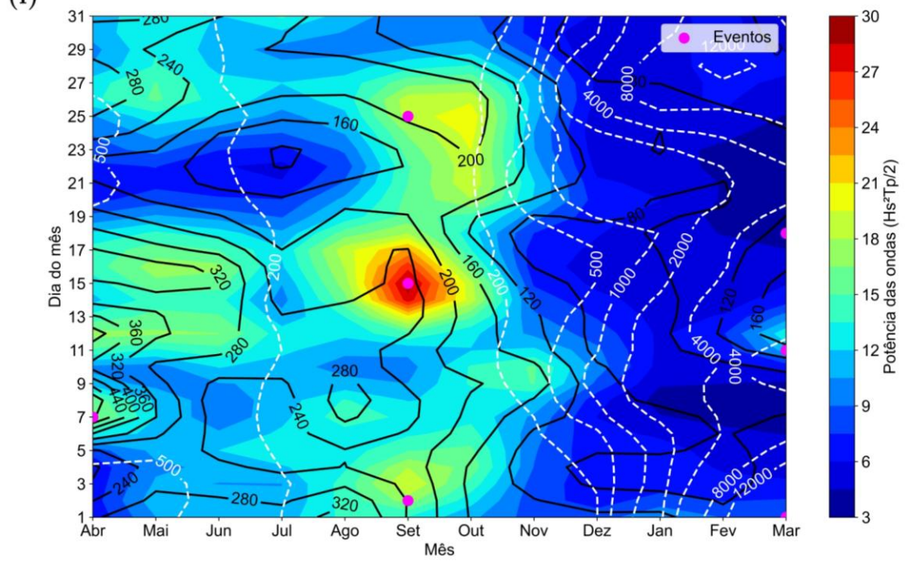
Figura 2: Turbidez/Concentração de sedimento em suspensão na coluna d'água.

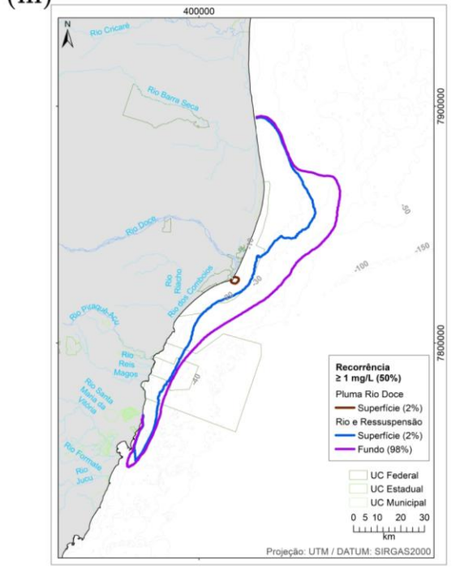


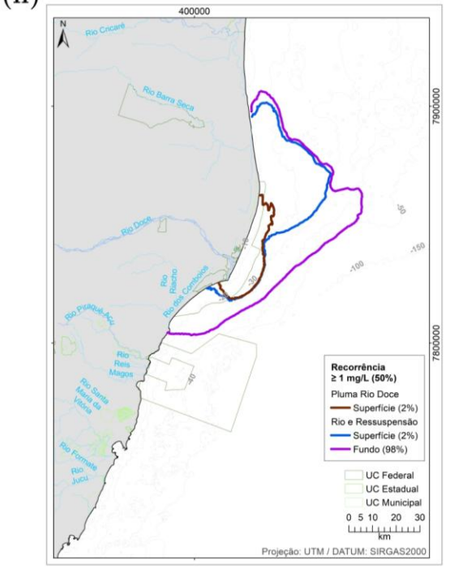
Estação	Período Seco (Ano 7)	Período Chuvoso (Ano 8)
N6	2,3	0,3
N5	4,8	1,6
N4	7,9	2,7
N3	9,2	3,0
N2	10,0	1,3
N1	13,9	2,6
S6	-5,1	-3,8
S5	3,0	-0,6
S4	10,4	2,6


(j)
(j1)
(j2)
(j3)
(j4)
Velocidade do vento (m/s)
Hs (m)
Tp (s)
Dp (°)
Abr/25
Mai/25
Jun/25
Jul/25
Ago/25
Set/25
Out/25
Nov/25
Dez/25
Jan/26
Fev/26
Mar/26
04-25
07-25
10-25
01-26
Fundeio 3
Fundeio 4


(k)
(k1)
(k2)
(k3)
Fundo → Superfície
Superfície → Fundo
CSS (rio Doce + depósito) (mg/L)
Turbidez de fundo (NTU)
Turbidez de superfície (NTU)
Fundeio 3
Fundeio 4
SiMCosta
Abr/25
Mai/25
Jun/25
Jul/25
Ago/25
Set/25
Out/25
Nov/25
Dez/25
Jan/26
Fev/26
Mar/26
Abr/26
04-25
07-25
10-25
01-26


(l)
Eventos
Dia do mês
Mês
Potência das ondas (Hs²Tp/2)
Abr
Mai
Jun
Jul
Ago
Set
Out
Nov
Dez
Jan
Fev
Mar


(m)
Recorrência
≥ 1 mg/L (50%)
Pluma Rio Doce
Superfície (2%)
Rio e Ressuspensão
Superfície (2%)
Fundo (98%)
UC Federal
UC Estadual
UC Municipal
Projeção: UTM / DATUM: SIRGAS2000


(n)
Recorrência
≥ 1 mg/L (50%)
Pluma Rio Doce
Superfície (2%)
Rio e Ressuspensão
Superfície (2%)
Fundo (98%)
UC Federal
UC Estadual
UC Municipal
Projeção: UTM / DATUM: SIRGAS2000

Distribuição espaço-temporal da turbidez/concentração de sedimento em suspensão (CSS) na plataforma continental próximo à desembocadura do rio Doce, abrangendo o período de realização do PMBA/Fest-UFES, de outubro de 2018 a março de 2026: a. Distribuição espacial da frequência de ocorrência de turbidez superficial ≥ 5 FNU a partir dos dados disponíveis provenientes do satélite AQUA para os períodos secos dos Anos 1 ao 7 próximos à desembocadura do rio Doce. A linha rosa delimita a área na qual a frequência de ocorrência da turbidez superficial ≥ 2 FNU foi igual ou superior a 20%. **b.** Distribuição espacial da frequência de ocorrência de turbidez superficial ≥ 5 FNU a partir dos dados provenientes do satélite AQUA para os períodos chuvosos dos Anos 1 ao 8 próximos à desembocadura do rio Doce. A linha rosa delimita a área na qual a frequência de ocorrência da turbidez superficial ≥ 2 FNU foi igual ou superior a 20%. **c.** Resumo estatístico das vazões litorâneas residuais obtidas através de simulações numéricas para os períodos chuvosos e secos ao longo dos anos de monitoramento do PMBA/Fest-UFES, que indicam a capacidade de transporte calculada para a zona de surfe considerando os perfis de praia distribuídos ao longo da linha de costa. Os valores mínimos, médios e máximos das vazões médias entre os Anos 1 e 7 dos períodos secos (em escala de marrom) e entre os Anos 1 e 8 dos períodos chuvosos (em escala de azul) representam a amplitude de variação da vazão litorânea em cada perfil. Para os cálculos dos valores médios anuais (verde) foi considerado o período de simulação compreendido entre os Anos 1 e 7 de realização do PMBA/Fest-UFES. **d.** Valores médios das vazões litorâneas residuais obtidas a partir das simulações numéricas para nove perfis de praia distribuídos ao longo da linha de costa durante o período seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8 de monitoramento do PMBA/Fest-UFES. As localizações dos perfis estão indicadas na Figura c. Os valores positivos indicam que o transporte litorâneo predominante é para norte, enquanto os valores negativos indicam que o transporte predominante é para sul, considerando a foz do rio Doce como referência. **e.** Espectro direcional médio histórico de ondas para o **(e_1)** período seco (do Ano 1 ao 7) e para o **(e_2)** período chuvoso (do Ano 1 ao 7). O eixo radial representa a frequência (Hz) e o eixo angular indica a direção de proveniência das ondas (graus). As cores mapeiam a Densidade Espectral (m^2/Hz deg). **f.** Isolinhas de recorrência de 50% (mediana) dos valores de concentrações de sedimentos em suspensão ≥ 1 mg/l da pluma proveniente do rio Doce (linhas tracejadas) e da pluma originada a partir da ressuspensão de materiais do Banco Lamoso (linhas contínuas), considerando as simulações numéricas bidimensionais (2DH) para os períodos secos ao longo dos anos de execução do PMBA/Fest-UFES. **g.** Isolinhas de recorrência de 50% (mediana) dos valores de concentrações de sedimentos em suspensão ≥ 1 mg/l da pluma proveniente do rio Doce (linhas tracejadas) e da pluma originada a partir da ressuspensão de materiais do Banco Lamoso (linhas contínuas), considerando as simulações numéricas bidimensionais (2DH) para os períodos chuvosos ao longo dos anos de execução do PMBA/Fest-UFES. **h.** Potência média das ondas para os períodos secos (em cinza) e chuvosos (em azul) ao longo de todo o monitoramento, utilizando dados medidos de altura significativa de ondas (Hs) e período de pico (Tp) no fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3) ($P_{médio}$ = Hs^2 Tp/2). **i.** Séries temporais obtidas para todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES. As faixas verticais vermelhas destacam os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho no Setor Foz. As áreas azuis e cinzas indicam os períodos chuvosos e secos, respectivamente. **(i_1)** Variação horária da descarga de sólidos em

suspensão do rio Doce (QSS - t/d), fornecida pelo Tema Integração Fluvio-Estuarina do Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest-UFES, calculada para a estação P21 (Linhares - ES); **(i_2)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida na estação automática RDO-16 Boia (Linhares - ES) do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos da Fundação Renova (PMQQS); **(i_3)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida em superfície no ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3); **(i_4)** Variação temporal da Altura Significativa de Ondas – Hs (m), medida no ponto de fundeio localizado no subsetor Foz Norte (Fundeio 3)**; (i_5)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida no fundo do fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3). As lacunas nas séries temporais representam períodos sem aquisição de dados em decorrência de falhas operacionais dos equipamentos. **j.** Séries temporais obtidas para o período seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8 do PMBA/Fest-UFES (abril/2025 a março/2026)**: (j_1)** Variação temporal do vento (m/s - notação meteorológica – Norte positivo, Sul negativo) proveniente da reanálise do ERA5/ECMWF para o ponto 39,75°O e 19,75°S a cada 2 horas; **(j_2)** Variações temporais horária de Hs (m) medidas nos pontos de fundeio localizados no Subsetor Foz Norte (em vermelho - Fundeio 3) e no Setor Norte (em azul - Fundeio 4); **(j_3)** Variações temporais horárias Tp (s) medidas nos pontos de fundeio localizados no Subsetor Foz Norte (em vermelho - Fundeio 3) e no Setor Norte (em azul - Fundeio 4); **(j_4)** Variações temporais horárias da direção de ondas (Dp - graus) medidas nos pontos de fundeio localizados no Subsetor Foz Norte (em vermelho - Fundeio 3) e no Setor Norte (em azul - Fundeio 4). Todas as lacunas nas séries temporais apresentadas indicam ausência de dados. As linhas tracejadas verticais verdes delimitam os eventos destacados neste relatório. **k. (k_1)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida na superfície (azul) e próxima ao fundo (preto), e da variação da CSS (mg/L) obtida a partir de simulação numérica tridimensional (3D), considerando as fontes do rio Doce e do Banco Lamoso para a localização do Fundeio 3 (Subsetor Foz Norte); **(k_2)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida na superfície (azul) e próxima ao fundo (preto), e da variação da CSS (mg/L) obtida a partir de simulação numérica tridimensional (3D), considerando as fontes do rio Doce e do Banco Lamoso para a localização do Fundeio 4 (Setor Norte); **(k_3)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida na superfície (azul) e da variação da CSS (mg/L) obtida a partir de simulação numérica tridimensional (3D), considerando as fontes do rio Doce e do Banco Lamoso para a localização da boia do SiMCosta ES-1 (39,46°O e 19,41°S). Todas as lacunas nas séries temporais apresentadas indicam ausência de dados. As linhas tracejadas verticais verdes delimitam os eventos destacados neste relatório. **l.** Potência das ondas ($P = Hs^2\ Tp/2$) durante os períodos seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8 do PMBA/Fest-UFES (abril/2025 a março/2026), calculada a partir dos dados medidos de Hs e Tp no fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3). As isolinhas pretas correspondem à CSS (mg/L) oriundos da simulação numérica tridimensional (3D) em 98% da coluna d'água (fundo). As isolinhas tracejadas brancas correspondem à QSS do rio Doce (t/d) fornecida pelo Tema Integração Fluvio-Estuarina do Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest-UFES, calculada para a estação P21 (Linhares - ES). Os círculos rosas destacam os principais eventos com picos de turbidez ao longo do último ano de monitoramento. **m.** Área de abrangência da recorrência de 50% (mediana) de CSS ≥ 1 mg/l durante o evento de maior potência de ondas observado no período seco do Ano 7 (11 a 19 de setembro de 2025), obtida a partir de simulações numéricas tridimensionais. São apresentados os limites da pluma do rio Doce na

superfície (2% da coluna d'água; marrom), da contribuição conjunta da pluma do rio Doce e da ressuspensão de sedimentos na superfície (2% da coluna d'água; azul) e da ressuspensão de sedimentos no fundo (98% da coluna d'água; magenta). **n.** Área de abrangência da recorrência de 50% (mediana) de CSS ≥ 1 mg/l obtida a partir de simulações numéricas tridimensionais, durante o evento de maior pico de vazão e QSS do rio Doce observado no período chuvoso do Ano 8 (01 a 03 de março de 2026), coincidente com o aumento de Hs (~1,5 m). São apresentados os limites da pluma do rio Doce na superfície (2% da coluna d'água; marrom), da contribuição conjunta da pluma do rio Doce e da ressuspensão de sedimentos na superfície (2% da coluna d'água; azul) e da ressuspensão de sedimentos no fundo (98% da coluna d'água; magenta).

O indicador Turbidez está associado à concentração de sedimentos em suspensão, pois reflete tanto o aporte de sedimentos oriundos do rio Doce para a plataforma continental do Espírito Santo, quanto a ressuspensão de sedimentos do Banco Lamoso adjacente à sua foz. A análise desse parâmetro contribuiu para a compreensão da dinâmica de dispersão destes materiais na plataforma continental interna, auxiliando na investigação do destino do MLD. Figura 2Figura 2Figura 2Figura 2Figura 2

Para todos os períodos analisados, as áreas da plataforma delimitadas pela isolinha de 20% de recorrência de turbidez ≥ 2 FNU, estimadas via sensoriamento remoto, apresentaram maior extensão nos períodos secos, alcançando a isóbata de 20 m próxima a Degredo – ES (Figura 2a). Isso foi reflexo da maior frequência de ocorrência de eventos de ressuspensão durante as estações secas (Figura 2i$_4$ e Figura 2i$_5$). Durante esse período há maior recorrência de sistemas transientes, que contribuem para o aumento da Hs e do Tp, resultando no incremento da potência das ondas (Figura 2h). A análise dos espectros médios históricos totais confirmou essa diferenciação na assinatura energética e direcional do regime de ondas, mostrando um ganho de energia no período seco (Figura 2e$_1$). Esse aumento pode ser explicado pelo predomínio de ondas de swell, com núcleos de energia que se concentram no quadrante S-SE na banda de frequências mais baixas, justificando o estado de maior energia e a persistência de condições favoráveis à ressuspensão de sedimentos na plataforma. De modo consistente, os resultados das simulações numéricas bidimensionais (2DH) para os períodos secos, indicaram que as áreas de recorrência de 50% (mediana) dos valores de concentração de sedimentos em suspensão ≥ 1 mg/L abrangeram a plataforma continental adjacente ao rio Doce, estendendo-se desde o limite norte do REVIS de Santa Cruz, ao sul da foz do rio Doce, até as proximidades de Barra Nova - ES, localizado ao norte da foz (Figura 2f). Ao longo do monitoramento, as maiores áreas da pluma de sedimentos relacionadas à ressuspensão ocorreram nos períodos secos dos Anos 1 (1.991 km²) e 7 (1.917 km²) (Figura 2f), que também apresentaram as maiores potências de ondas, com médias de 14,20 kW/m e 12,57 kW/m, respectivamente (Figura 2h). Próximo ao leito marinho (Subsetor Foz Norte, fundeio F3), a turbidez atingiu valores medianos de 193 NTU durante os eventos de ressuspensão de sedimentos do banco lamoso em função da atuação das ondas, sendo que em 25% do período analisado esses valores estiveram acima de 366 NTU (Figura 2i$_5$). Destacadamente, o período seco do Ano 7 caracterizou-se por apresentar os maiores valores médios e medianos de Hs (~1,5m, para ambos os parâmetros) (Figura 2j$_2$), com Tp acima de ~12s em 25% do período de medições em F3 (Figura 2j$_3$). Neste fundeio, próximo ao fundo, os valores medianos de turbidez atingiram 263 NTU, com valores

acima de 468 NTU em 25% do período investigado (Figura 2k$_1$). Dentre os principais eventos de ressuspensão de sedimentos registrados durante o período seco do Ano 7, destaca-se, por exemplo, o ocorrido entre os dias 06 e 14 de abril de 2025, período concomitante ao de aquisição de dados da campanha 04-25 do Marinho Integrado nos setores Foz e APA Costa das Algas (Figura 2j, Figura 2k e Figura 2l). Neste evento o valor máximo de Hs registrado foi de 2,6 m (Figura 2j$_2$), o Tp foi superior a 10 s e as ondulações primordialmente provenientes do quadrante SE no Fundeio 3 (Figura 2j$_3$). Essas condições foram acompanhadas por um aumento expressivo da turbidez de fundo, que atingiu 1.255 NTU no dia 07 de abril, aproximadamente quatro vezes acima do valor mediano (309 NTU) calculado para este período seco (Figura 2k$_1$). Outro evento de ressuspensão que se destacou durante o período seco do Ano 7, ocorreu no mês de setembro de 2025 (Figura 2j, Figura 2k e Figura 2l). Neste evento os valores de Hs medidos no Fundeio 3 ultrapassaram 3 m nos dias 2, 15 e 25 de setembro (Figura 2j$_2$), sendo o último acompanhado de um aumento de turbidez no fundo do Fundeio 4, que atingiu valores superiores a 250 NTU e máximo de 900 NTU (Figura 2k$_2$). Na boia do SIMCosta foram registrados picos de turbidez entre os dias 13 e 17 de setembro, com valores próximos a 100 NTU (Figura 2k$_3$). Entre os dias 11 e 19 de setembro ocorreu o período mais energético, no qual a potência de ondas foi igual a 30 kW/m (Figura 2l) apresentando Tp > 15 s (Figura 2j$_3$) e ondulações de SE-SSE (Figura 2j$_4$). No início deste evento, os ventos eram predominantes do quadrante SE, rotacionando para NE no dia 14 (Figura 2j$_1$). Os resultados das simulações numéricas indicaram que a recorrência de 50% das concentrações de sedimentos ressuspendidos (≥ 1 mg/L) na superfície localizou-se próximo à linha de costa, estendendo-se por aproximadamente 30 km ao sul do limite inferior da APA Costas das Algas (Figura 2m). Além disso, os resultados das simulações numéricas de pontos da grade numérica situados nas mesmas coordenadas onde estão os fundeios para aquisição de dados *in situ* (Subsetor Foz Norte (Fundeio 3), Setor Norte (Fundeio 4)) e no ponto da boia do SIMCosta, registraram a ressuspensão de sedimentos do Banco Lamoso, com o consequente aumento da turbidez em toda a coluna e na superfície d'água (Figura 2k$_1$, Figura 2k$_2$ e Figura 2k$_3$, respectivamente). Assim como a ressuspensão dos sedimentos é intensificada durante os períodos secos pela maior energia de ondas, a descarga sólida em suspensão (QSS) do rio Doce apresentou comportamento predominantemente sazonal, com os maiores valores registrados durante os períodos chuvosos (Figura 2i$_1$) refletindo o aumento do aporte fluvial de sedimentos característicos dessa estação. Durante os períodos secos, em contrapartida, a disponibilidade de sedimentos provenientes do rio Doce foi significativamente menor. Dentre os períodos secos investigados, o maior valor de QSS foi estimado para o Ano 2 (9,43×10^3 t/d), enquanto os demais anos apresentaram valores inferiores a 40% da máxima histórica da estação seca (Figura 2i$_1$). O Ano 5 apresentou o segundo maior pico (3,54×10^3 t/d; ~37,6%), seguido dos Anos 6 (2,93 ×10^3 t/d; ~31%) e 3 (2,35×10^3 t/d; ~25%) (Figura 2i$_1$). Os menores valores ocorreram nos Anos 4 (1,63 ×10^3 t/d; ~17,3%), 7 (1,47 ×10^3 t/d; ~15,5%) e 1, que apresentou o menor valor (0,69×10^3 t/d; ~7,3%) (Figura 2i$_1$). Em termos sazonais, embora o pico de QSS registrado durante o período seco do Ano 7 tenha correspondido a 15,5% da máxima histórica da estação seca, ele representou apenas 5,4% do máximo observado durante o período chuvoso do mesmo ano (Figura 2i$_1$), reforçando que, ao longo da estação seca, a disponibilidade de sedimentos oriundos do rio Doce é significativamente reduzida quando comparada àquela observada durante a estação chuvosa. Em contraste com o observado durante os

períodos secos, os períodos chuvosos caracterizaram-se por uma redução da área ocupada pela pluma de sedimentos gerada pela ressuspensão de material do leito marinho (Figura 2b e Figura 2g). Esse comportamento evidencia uma mudança no processo dominante de fornecimento de sedimentos em suspensão para a plataforma continental, com a contribuição da ressuspensão sendo substituída pela predominância do aporte fluvial do rio Doce. Como consequência desse aumento da QSS do rio Doce durante os períodos chuvosos, os valores de turbidez ≥ 5 FNU estimados via sensoriamento remoto foram observados até as proximidades da isóbata de 30 m no Setor Foz, com os maiores valores concentrados próximo à desembocadura do rio, onde a recorrência ultrapassou 80% (Figura 2b). A maior extensão e recorrência da pluma de CSS gerada a partir da vazão do rio Doce coincidiu com o período de maior aporte de sedimentos do rio para a plataforma continental (Figura 2g). Durante os eventos em que foram registrados aumentos dos valores de QSS, predominaram condições de ondas e ventos de N-NE, que favoreceram a dispersão do material particulado na região costeira (não mostrado). Essa condição dinâmica também é refletida nos espectros médios históricos para o período chuvoso, que apresenta um padrão mais equilibrado entre os sistemas (ondas remotas - Swell e ondas locais) (Figura $2e_2$). Esse padrão é caracterizado pelo alargamento e persistência da energia no quadrante NE-E em frequências mais altas, refletindo a atuação contínua dos ventos de NE associados à Alta Subtropical do Atlântico Sul, o que resulta em um regime de energia de ondas mais branda quando comparado ao período seco (Figura $2e_2$). A potência de ondas confirma essa redução de energia sendo aproximadamente 50% (6,60 kW/m) do valor calculado para o período seco do Ano 7 (12,57 kW/m) (h). Dentre os anos analisados, o maior valor de QSS estimado para o período chuvoso ocorreu no Ano 2 ($215{,}43\times10^3$ t/d) (Figura $2i_1$). Para o período chuvoso do Ano 8 o maior valor estimado foi de $42{,}35\times10^3$ t/d (Figura $2i_1$), sendo este cerca de 19,6% do máximo histórico dentre as estações chuvosas monitoradas, o que refletiu na ocorrência de uma das menores áreas da pluma de CSS observada desde o início do monitoramento (1.600 km²) (Figura 2g). Apesar disso, durante o período chuvoso do Ano 8, destacou-se a ocorrência de um evento de Inundação do rio Doce em 01 de março de 2026, quando a vazão do rio Doce alcançou cerca de 2.881 m³/s (Figura $1f_1$) e a descarga sólida foi de aproximadamente $42{,}35\times10^3$ t/d (Figura $2i_1$). No dia anterior a este evento, a altura significativa das ondas atingiu aproximadamente 2 m (Figura $2j_2$), sob regime de ondas provenientes de ENE, que posteriormente rotacionaram para ESE-S (Figura $2j_4$). Durante o pico de vazão, Hs variou entre 1,1 e 1,8 m (Figura $2j_2$), enquanto o Tp oscilou entre 7 e 10 s (Figura $2j_3$), sob ventos predominantes dos quadrantes SO-S-SE (Figura $2j_1$). A atuação conjunta dessas condições meteoceanográficas e do aumento da vazão promoveu a expansão da pluma do rio Doce em direção ao norte, delimitando uma área de aproximadamente 390 km² para a recorrência de 50% de concentrações superficiais de sedimentos em suspensão ≥ 1 mg/L (Figura 2n). Sob essas condições, a deriva litorânea permaneceu direcionada para norte em todos os pontos analisados, alcançando vazões líquidas de 13,8 m³/s, favorecendo o transporte tanto dos sedimentos provenientes do rio Doce quanto daqueles ressuspendidos do banco lamoso (não mostrado). Como resultado, a pluma formada pela combinação entre o aporte fluvial e a ressuspensão ocupou aproximadamente 1.466 km², estendendo-se desde a região próximo a foz do rio Doce até próximo de Barra Nova - ES, localizada ao norte da foz (Figura 2n), enquanto a turbidez medida no Fundeio 3 permaneceu acima de 800 NTU até o dia 06 de março (Figura $2k_1$). Embora o pico

de vazão tenha sido registrado no início do mês, um segundo evento relevante ocorreu poucos dias depois associado, predominantemente, à ressuspensão induzida pela atuação de ondas (Figura 2j, Figura 2k e Figura 2l). No dia 11 de março observou-se um novo aumento da altura significativa (Hs = 2,2 m) (Figura 2j_2), acompanhado por um período de pico de aproximadamente 15 s (Figura 2j_3). Como consequência, no dia 13 a turbidez de fundo atingiu 1.251 NTU no Fundeio 3 (Subsetor Foz Norte) (Figura 2k_1) e, posteriormente, no dia 18 de março, a turbidez medida na boia ES-1 do SiMCosta alcançou aproximadamente 117 NTU (Figura 2k_3). Esses resultados indicam que mesmo nos períodos chuvosos, a incidência de ondas energéticas promoveu a ressuspensão de sedimentos do banco lamoso, proporcionando o aumento das concentrações de sedimentos em suspensão na plataforma continental. O destino dos sedimentos em suspensão dentro da faixa litorânea compreendida pelo sistema praial, tem a deriva litorânea como um processo físico de captação, redistribuição e transporte desses sedimentos para outras áreas, sejam estes sedimentos oriundos da ressuspensão do banco lamoso ou mesmo da descarga do rio Doce. De modo geral, os cálculos mostraram que os valores de vazão líquida para os períodos secos são superiores aos observados durante os períodos chuvosos (Figura 2c). Em todas as estações, a vazão litorânea média esteve direcionada para norte, exceto em S6 (39,88°O e 19,67°S) onde esteve direcionada para o sul e apresentou valor médio anual de 5,4 m^3/s (Figura 2c). Especificamente no período seco do Ano 7 (Figura 2d), a vazão litorânea apresentou valores médios muito próximos aos calculados para o Ano 1, que teve o período de maior potência das ondas (Figura 2h). Nesse período, os valores médios das vazões líquida apresentaram amplitude de variação entre 2,3 e 13,9 m^3/s nas estações analisadas, sendo semelhante à máxima média obtida para o Ano 1 (14,2 m^3/s). Para os oito períodos chuvosos, as vazões litorâneas residuais relativas indicaram que o transporte predominante é para norte nas estações ao norte e para sul nas estações ao sul, da foz do rio Doce, com exceção da estação S4 (40,05°O e 19,81°S), localizada ao sul que apresentou transporte predominante para o norte (Figura 2c). No Ano chuvoso 8, os valores médios das vazões líquidas mostraram amplitude de variação pequena (0,30 a 4 m^3/s), quando comparados com o período seco do Ano 7. Ainda, apesar da a direção do vento predominante ser N-NE durante os períodos chuvosos (Figura 1c_2), o transporte litorâneo residual segue em direção norte sem apresentar alteração em função da ação do vento (Figura 2c). Este comportamento ressalta o controle do clima de ondas e das características da praia na deriva litorânea. No intuito de avaliar a contribuição da vazão litorânea em termos de capacidade de transporte, ela foi comparada à vazão do rio Doce na estação N1 (39,78°O e 19,58°S), localizada ao norte da desembocadura do rio, visto que este é um dos principais processos físicos que controla a dinâmica da área costeira adjacente à foz do rio Doce. Para esta avaliação a vazão litorânea foi normalizada pela vazão líquida do rio Doce (Figura 2i_1). Ressalta-se, entretanto, que esses dois processos físicos são independentes entre si, uma vez que a vazão litorânea é controlada pelo clima de ondas, enquanto a vazão do rio é controlada pelo regime pluviométrico na bacia de drenagem. Como resultado, obteve-se que a capacidade média de transporte pela deriva litorânea foi em torno de 1% da vazão do rio Doce durante o período seco do Ano 7, enquanto no período chuvoso do Ano 8, devido a menor energia das ondas e ao aumento da vazão do rio, a comparação entre as vazões foi insignificante. Apesar disso, destaca-se que durante os períodos chuvosos (Figura 2j_2), quando há a ocorrência de eventos em que são registrados aumentos da energia das ondas, a vazão

líquida litorânea pode corresponder a até cerca de 5% da vazão do rio Doce, contribuindo para o transporte de sedimentos ao longo de todo o ano (residual) para a porção localizada ao norte da foz do rio Doce.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO

Ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-UFES, o Tema Modelagem Numérica focou na avaliação das forçantes hidrológicas e meteoceanográficas para caracterizar a hidrodinâmica marinha e apoiar a interpretação dos resultados dos outros temas. Também foi destacada a descrição espaço-temporal da turbidez, concentração de sedimentos e salinidade superficial, que ajudaram na compreensão da dinâmica de dispersão da pluma do rio Doce e da ressuspensão de material lamoso na plataforma continental, especialmente em áreas afetadas pelo Rompimento da Barragem. A análise da variabilidade espaço-temporal foi possível graças à integração de dados *in situ*, sensoriamento remoto e modelagens numéricas, oferecendo uma visão abrangente dos processos dinâmicos na região costeira adjacente ao rio Doce.

A vazão fluvial e a ressuspensão por ondas interferiram de duas formas distintas na turbidez e na salinidade superficial: como eventos crônicos (contínuos) ou agudos (pontuais), que geram respostas distintas dos indicadores no ambiente. Entende-se como eventos agudos os picos de vazão devido ao aumento da precipitação na bacia que ocorreram durante os períodos chuvosos (de outubro a março) e os aumentos de energia de ondas devido à passagem de sistemas transientes mais frequentes durante os períodos secos (de abril a setembro).

Os eventos hidrológicos que ocorreram na bacia do rio Doce resultaram em aumentos expressivos da carga sedimentar transportada pelo rio, intensificando o aporte de MLD à plataforma continental. No ambiente marinho, a pluma do rio Doce foi advectada em função das condições meteorológicas e hidrodinâmicas costeiras: ventos NE e correntes SO deslocam a pluma para o sul, afastada da costa, enquanto ventos do quadrante sul e correntes NE deslocaram a pluma para o norte, próximo à costa. As maiores áreas de influência do aporte fluvial ocorreram durante eventos combinados de altas vazões e inversões de ventos, associadas à passagem de sistemas transientes.

O material particulado proveniente do aporte fluvial na plataforma continental ficou sujeito à floculação e deposição no leito marinho. A ressuspensão desse material ocorreu quando a tensão oscilatória de fundo gerada por ondas e correntes de maré superou o limite crítico necessário para romper a coesividade do depósito lamoso ou em situações de variações abruptas de pressão na coluna d'água induzidas por turbulência. Ondas de maior altura e período de pico, características dos períodos secos, foram as principais responsáveis pela ressuspensão dos sedimentos depositados no leito marinho e à manutenção desse material em suspensão, facilitando seu transporte por correntes costeiras geradas pela tensão de cisalhamento do vento, pelas correntes residuais de maré e pela deriva litorânea. Esses processos promoveram a redistribuição dos sedimentos na plataforma continental interna, com possibilidade de transferência para áreas além da foz do rio Doce.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos integralmente para o Tema Modelagem Numérica.

6 REFERÊNCIAS

ALBERNAZ, A.; et al. Improved calculation of nonlinear near-bed wave orbital velocity in shallow water: validation against laboratory and field data. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 2, p. 81, 2020.

AURIN, D. *et al*. Spatially resolving ocean color and sediment dispersion in river plumes, coastal systems, and continental shelf waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 137, p. 212-225. 2013.

BANDEIRA, M. D. O., GRILO, C. F., OLIVEIRA, K. S. S., BASTOS, A. C., & QUARESMA, V. D. S. (2025). Assessment of the Erodibility of Cohesive Sediment with Varied Sand Content. **Coasts**, v. 5(4), n. 46.

BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; MARANGONI, M. B.; D' AGOSTINI, D. P.; BOURGUIGNON, S. N.; CETTO, P. H.; SILVA, A. E.; AMADO FILHO, G. M.; MOURA, R. L.; COLLINS, M. Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: A synthesis from a mixed siliciclastic-carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. **Journal of South American Earth Sciences**. v.63, p.125-136. 2015.

BATTJES, J. A.; JANSSEN, J. P. F. M. Energy Loss and Set-Up Due to Breaking of Random Waves. **Coastal Engineering**. 1978

BOSBOOM, J.; STIVE, M. J. F. **Coastal dynamics I: lecture notes** *CIE4305*. DELFT. 2012

CARRERE, L.; LYARD, F.; CANCET, M.; GUILLOT, A.; PICOT, N.: FES2014, a new tidal model - Validation results and perspectives for improvements, presentation to ESA Living Planet Conference, Prague. 2016.

CERC. **Coastal Engineering Research Center (CERC). Shore Protection Manual (SPM).** US Army. EUA. 1984

CHAPMAN, D.C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. **J. Phys. Oceanogr**. 15, 1060–1075. 1985.

DELFT3D-FLOW. Delft3D-FLOW, User Manual. Deltares: Delft. The Netherlands. 725 p. 2023.

DELFT3D-WAVE. Delft3D-WAVE, User Manual. Deltares: Delft. The Netherlands. 219 p. 2023.

DOGLIOTTI, A. I. *et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 157-168. 2015.

EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 19 (2), 183–204. 2002.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/Fest–RT-43, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 193 pag. 2023.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/Fest–RT-46, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 306 pag. 2024.

FLATHER, R. A. A tidal model of the northwest European continental shelf. **Memories de la Societe Royale des Sciences de Liege**, 6 (10), pp. 141-164. 1976.

GORDON, H. R.; McCLUNEY, W., R. Estimation of the depth of the sunlight penetration in the sea for remote sensing. **Apllied Optics**, v. 14, n. 2. 1975.

GUTKNECHT, E. *et al*. Coupled physical/biogeochemical modeling including O2-dependent processes in the eastern boundary upwelling systems: application in the Benguela. **Biogeosciences**, 10 (5), 3359-3591, 2013.

HERSBACH, H. *et al*. The ERA5 Global Reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 1999-2049. 2020.

HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). Consortium for data assimilative modeling HYCOM+NCODA Global 1/12o analysis [online]. Lodz: HYCOM. Disponível em: http://www.hycom.org/dataserver/glb584analysis/. 2011.

KOMAR, P. D.; GAUGHAN, M. Airy wave theories and breaker height prediction. **Proc. 13th Coastal Engineering Conf**. *ASCEM*, 405–418. 1973.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves, 2. **Journal of Geophysical Research**, *75*(33), 6690–6801. 1970a.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. **J Geophys Res**, *75*(33), 6778–6789. 1970b.

LYARD, F.; CARRERE, L.; CANCET, M.; GUILLOT, A.; PICOT, N.: FES2014, a new finite elements tidal model for global ocean, in preparation, to be submitted to Ocean Dynamics in 2016.

McDOUGALL, T. J.; BARKER, P. M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox, 28 pp. SCOR/IAPSO WG127, ISBN 978-0-646-55621-5.

McTAGGART, K. E.; JOHNSON, G. C.; JOHNSON, M. C.; DELAHOYDE, F. M.; SWIFT, J. H. Notes on CTD/O2 data acquisition and processing using Sea-Bird hardware and software (as available). The GO-SHIP Repeat Hydrography Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines, IOCCP Report 15.:10pp. 2010.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: data/10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018. 2018.

OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, D. S. V. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 78, p. 101-115, 2017.

ORLANSKI, I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. **J. Comp. Sci**. 21(3), 251–269. 1976.

OSADCHIEV, A. A.; ZAVIALOV, P. O. Lagrangian model for surface-advected river plume. **Cont. Shelf Res**. 58, 96–106, 2013.

PEREIRA, A.F.; BELEM, A.L.; CASTRO, B.M.; GEREMIAS, R. Tide-topography interaction along the Eastern Brazilian Shelf. **Continental Shelf Research** 25 (12–13), 1521–1539. 2005.

RAYMOND, W.H.; KUO, H.L. A radiation boundary condition for multi-dimensional flows. **Quart. J. R. Met. Soc**. 110, 535–551. 1984.

RODRIGUEZ, H. N.; MEHTA, A. J. Longshore transport of fine-grained sediment. **Continental Shelf Research**, 20(12–13), 1419–1432. 2000.

RRDM. Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 4 Praias. RT-20, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 2019a.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Modelagem Numérica. RT-19D, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 246 pag. 2019b.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual - Evolução espaço-temporal na qualidade ambiental e na biodiversidade no ambiente costeiro – RT-36C. Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-Santense de Tecnologia. 422 pgs. 2020.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest – RRDM – Evolução espaço-temporal do Ambiente Marinho. RT-39D, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 1410 pag. 2022.

SEA-BIRD ELECTRONICS. Seasoft V2: SBE Data Processing CTD Data Processing and Plotting Software for Windows XP, Windows Vista, or Windows 7. User's Manual. 2013.

SOULSBY, R. L. Dynamics of Marine Sands. London: Thomas Telford, 1997.

SOUZA, R. B. Oceanografia por satélites. Oficina de Textos, 2005.

VIEIRA, F. V.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; LEITE, M. D.; COSTA Jr, A.; OLIVEIRA, K. S. S.; DALVI, C. F.; BAHIA, R. G.; HOLZ, V. L.; MOURA, R. L.; AMADO FILHO, G. M. Along-Shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. **Continental Shelf Research,** v. 187, 103964. 2019.

VINZÓN, S. B.; GALLO, M. N.; GABIOUX, M.; FONSECA, D.; ACHETE, F.; GHISOLFI R.; MILL, G.; FONSECA, S; QUARESMA, V. S.; OLIVEIRA, K. S.S.; BRIGAGÃO, G.; MACHADO, L. G. The role of waves in the transport of fine sediments and mine tailings from the Fundão dam failure, Doce River, Brazil. **International Journal of Sediment Research**, 39 (1): 44 – 60. 2024.

WARNER, J.C. *et al*. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. **Ocean Model**. 8, 81–113. 2005.