

**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: Sedimentação Marinha

RT-52/OUT 25

RSE2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2025

EQUIPE TÉCNICA

Prof. Alex Cardoso Bastos (coordenador)

Profa. Valéria Quaresma

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Ana Carolina Ribeiro Fieschi Lavagnino

Anita Gomes Ruschi

Arthur Sant'Ana Cavichini

Fernanda Vedoato Vieira

Flávia Acypreste Alfredo Garonce

Jordan Syllas Saraiva Leite

Lara Ferreira Peçanha

Livia Rodrigues Garcez

Lorena Ferreira Monteiro

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	4
2	METODOLOGIA	4
2.1	COLETA	5
2.1.1	Sedimentologia (Marinho Integrado)	5
2.2	ANÁLISE.....	5
2.2.1	Análise de Material Particulado em Suspensão (MPS).....	5
2.2.2	Análise de sedimento superficial de fundo.....	6
2.2.3	Análise de densidade	6
2.2.4	Análise de mobilidade do fundo	6
2.2.5	Análise mineralógica do sedimento superficial	7
2.2.6	Análise estatística.....	8
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	9
2.4	ALTERAÇÕES DE MALHA/FREQUÊNCIA AMOSTRAIS REALIZADAS EM OUTUBRO E 2024 E SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES.....	9
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	10
3.1	MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA (% MO).....	11
3.2	POTENCIAL DE MOBILIDADE DO SEDIMENTO SUPERFICIAL DE FUNDO	34
3.3	VALORES DE IMS (<i>IRON MINERALOGICAL SET</i>) E PRESENÇA DO SINAL DE REJEITO NO SEDIMENTO DE FUNDO	41
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO A CERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	54
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	57
6	REFERÊNCIAS	57

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) passou por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento 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/Fest-UFES 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) e na Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024. 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

2.1.1 Sedimentologia (Marinho Integrado)

Para as análises realizadas por esse Tema, são coletadas amostras de água, de sedimento superficial de fundo e de densidade do sedimento superficial.

As amostras de água são coletadas em 3 profundidades da coluna d'água, por meio de garrafas de Van Dorn acopladas um rack de amostragem. Amostras de superfície são coletadas entre 15 e 30 cm de profundidade; amostras do meio da coluna d'água são coletadas na profundidade média de cada estação; e amostras do fundo da coluna d'água são coletadas a cerca de 1 m acima do fundo. Para cada profundidade, 1 L de água é amostrada. A água coletada é armazenada em garrafas de plástico de 1 L, devidamente limpas e identificadas, e acondicionadas sob refrigeração ($\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) e ao abrigo da luz até análise do material particulado em suspensão no laboratório.

As coletas de sedimento superficial são realizadas com um amostrador busca fundo do tipo Van Veen. Quando as amostras coletadas se apresentam lamosas, uma alíquota de 10 ml para a análise de densidade do sedimento superficial (primeiro centímetro do pacote) é subamostrada. As amostras de sedimento e de densidade são acondicionadas sob refrigeração ($\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) e ao abrigo da luz até análise em laboratório para evitar produção de matéria orgânica.

Os resultados dos indicadores Material Particulado em Suspensão (MPS), mobilidade do sedimento de fundo e Valores de IMS (Iron Mineralogical Set) e Presença do sinal de rejeito no sedimento de fundo, estão apresentados de forma setorizada, considerando as similaridades hidrodinâmicas e sedimentológicas entre as estações e, do Setor de menor latitude (Abrolhos) para o de maior latitude (Sul). As estações amostrais na foz do rio Doce e na APA Costa das Algas foram ainda subdivididas para a apresentação dos dados, também baseadas na similaridade hidrodinâmica e depósito sedimentar.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Análise de Material Particulado em Suspensão (MPS)

O processo de filtragem das amostras de água é realizado em filtros de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro e $0,45\mu\text{m}$ de diâmetro, previamente secos em estufa à 40°C por 24h, para determinação de seu peso original. Após a filtragem das amostras, os filtros são novamente levados à estufa à 40°C por 48h e pesados para a determinação do peso do MPS retido. A concentração do MPS é calculada através da diferença entre o peso do filtro antes e após a filtração, corrigido pelo volume filtrado de cada amostra (Mitchell *et al.*, 2017). Após a determinação do MPS, os filtros seguem para queima da matéria orgânica por combustão em mufla à 450°C por 4h (Mook e Hoskin, 1982) para a determinação do teor de matéria orgânica (MO) do MPS.

2.2.2 Análise de sedimento superficial de fundo

As amostras sedimentares (amostras superficiais) foram lavadas até a completa remoção de sal e depois foram secas em estufa à 40°C para aquisição do peso seco. A separação das frações grossas e finas foi realizada através do método de separação via úmida pela lavagem do sedimento com água destilada em uma peneira de malha com abertura de 63 µm. O sedimento que passa pela peneira é a fração fina (ou lama) enquanto o retido é a fração mais grossa (areia e cascalho) (Dias, 2004).

A determinação da granulometria das frações arenosas (> 63 µm) foi realizada pelo método de peneiramento via seca com peneiras intercaladas por malhas com abertura de 0,5 em 0,5 phi. Para as frações lamosas (< 63 µm) a granulometria foi determinada por um analisador de partículas a laser (*Malvern Mastersizer* 2000), também de 0,5 em 0,5 phi, após queima da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio para evitar floculação e alteração da granulometria durante a análise. O parâmetro granulométrico utilizado foi o diâmetro médio do grão (D50) e foi calculado pelo software Gradistat 8.0 (Blott e Pye, 2001) versão para Excel 2007-2010.

O teor de matéria orgânica do sedimento foi determinado pelo método de combustão em mufla à 450°C por 4h (Mook e Hoskin, 1982). O teor de carbonato de cálcio (CaCO₃) foi determinado a partir da queima com ácido clorídrico (30%) (Dias, 2004; Komada *et al.*, 2008; Quaresma *et al.*, 2015). Para a descrição ao longo do texto foram utilizadas as médias com os respectivos desvios padrão para dados de teores de cascalho, areia, lama, CaCO₃ e MO do sedimento superficial.

2.2.3 Análise de densidade

A amostragem foi feita de forma a coletar apenas a camada superficial de lama do pacote sedimentar, já que esta metodologia é aplicada apenas para sedimento lamoso. Quando o sedimento coletado pelas dragas se apresenta arenoso, a amostragem para esta análise não é realizada. Após coleta, as amostras são acondicionadas em recipientes de 10mL, previamente pesados em balança de precisão (4 casas decimais), e mantidas resfriadas até chegada ao laboratório. Em laboratório os recipientes são pesados para obtenção do peso úmido e, então, levados à estufa à 40°C por 48h ou até a amostra estar completamente seca. Após essa etapa os recipientes contendo as amostras, já secas, são novamente pesados. Para a determinação da densidade do sedimento superficial de fundo, foi utilizado o método descrito por Amos e Sutherland, (1994) e Soulsby, (1997), onde a densidade é igual a massa úmida pelo volume da mesma. Os dados foram apresentados sob a forma de densidade e em kg/m³. Para a apresentação gráfica, uma linha vermelha foi inserida onde delimita valores abaixo de 1200 kg/m³, os quais indicam a presença de lama fluida (McAnally *et al.*, 2007; Winterwerp e Kersteren, 2004). Estações que não apresentaram dados foram decorrentes da ausência de lama no sedimento.

2.2.4 Análise de mobilidade do fundo

A mobilidade do sedimento de fundo foi avaliada para os setores Norte, Foz Norte, Foz Central e Foz Sul. Eventos de mobilidade, para cada mês, foram contabilizados sempre que a tensão de cisalhamento

de fundo foi maior que a tensão crítica de ressuspensão local. O cálculo do percentual de mobilidade seguiu a seguinte metodologia:

- 1) Primeiramente, a Tensão crítica de ressuspensão média mensal para cada setor, calculada a partir da equação de Mitchener e Torfs (1996); $0,015 \cdot (\text{densidade úmida} - 1000)^{0,73}$. Para o cálculo foram considerados somente os dados de densidade coletados durante o PMBA/Fest-UFES.
- 2) Para cada medida horária de corrente próxima ao fundo, a tensão de cisalhamento de fundo foi calculada. O cálculo da tensão de cisalhamento de fundo foi feito através da equação de Reynolds ($\tau = -\rho \langle u' w' \rangle$), e utilizou os dados do ADCP 4 para o setor Norte e dados do ADCP 3 (ambos ADCPs vinculados ao Ambiente Marinho - Tema - Modelagem Numérica) para os setores Foz Norte, Foz Central e Foz Sul.
- 3) Para cada mês, a tensão de cisalhamento de fundo horária foi comparada à tensão crítica de ressuspensão mensal, e então foi calculada a porcentagem de tempo em que houve evento de mobilidade ao longo do mês.

2.2.5 Análise mineralógica do sedimento superficial

As análises mineralógicas foram realizadas nas frações lamosas (tamanho do grão $< 0,63 \mu\text{m}$), após peneiramento via úmida dos sedimentos de fundo (metodologia de separação descrita no Item 2.2.2). O limite de detecção é relacionado ao sinal/ruído das amostras quando lidas pelo difratômetro. Dessa forma, o limite de detecção de medidas mais simples é de 2.5% e nas mais apuradas é de 0.5%. No protocolo de análises laboratoriais estabelecido, após 2 horas no difratômetro, os resultados são comparados aos resultados obtidos nas análises de anos anteriores. Uma vez confirmados os resultados, as amostras seguem para análise de susceptibilidade magnética.

O procedimento analítico interpretativo das fases minerais na difratometria de Raios-X, têm como fontes principalmente fichas e bases minerais existentes na literatura e WEB, a principal base de dados utilizadas é a COD – Crystallography Open Database (Grazulis *et al.*, 2009) onde são listados parâmetros relativos aos distanciamentos dentro dos retículos cristalinos, além das relações angulares e axiais em diferentes espécies minerais. Neste sentido, o volume relativo de fases minerais percentualmente pode ser verificado através de uma análise semiquantitativa da forma e intensidade dos picos apresentados na medida de difração e comparadas as intensidades apresentadas nas fichas cristalográficas dos minerais.

Seguindo a convenção usual para representação geoquímica elementar de rochas e sedimentos (Rollinson, 1993), os elementos nos resultados das análises de fluorescência de raios-X estão expressos em óxidos e recalculados para 100% em peso em base anidra. O ferro total está expresso em FeO total. São considerados minerais essenciais aqueles que são superiores a 10%. Os minerais são aqueles que possuem teores menores de 10% e maiores que 1%. Os minerais que apresentam teores $< 1\%$ são considerados traço.

O erro máximo encontrado até o momento através desta técnica é de $\pm 5\%$ em volume. A química por fluorescência de raios-X complementa as informações da difração, fornecendo os principais constituintes químicos presentes em porcentagem em peso e partes por milhão (ppm), além de parâmetros quantitativos ao longo do tempo. A montagem que realiza a medida da susceptibilidade magnética ac (χ_{ac}) foi totalmente construída na UFES, onde a precisão de configuração é de 1 ppm.

Os resultados foram ratificados pelas medições de susceptibilidade magnética nas fases minerais que contém ferro (principalmente óxidos e hidróxidos). Os dados adquiridos em amostras prévias ao rompimento da barragem (2012) foram utilizados como amostras controle para fins de comparação, nomeadas de valor de referência.

A verificação da presença do MLD da Barragem de Fundão em sedimentos marinhos foi realizada através do reconhecimento do aumento relativo total de fases minerais como hematita, goethita, grenalita-T, maghemita e magnetita, as quais representam óxidos de ferro e silicatos contendo ferro das amostras analisadas (suíte de minerais com ferro), comparativamente aos dados de amostras anteriores ao rompimento da barragem (Orlando *et al.*, 2020). Da mesma forma, verificou-se aumentos nas susceptibilidades magnéticas totais e nas quantidades totais de ferro (FeO_{total}). Para caracterização da química mineral foram considerados como parâmetro o ferro total (FeO_{total}), a alumínio (Al_2O_3), a sílica (SiO_2) e o cálcio (CaO) por representarem os principais componentes presentes nas fases minerais encontradas nas amostras identificadas.

A presença/ausência do sinal do rejeito da Barragem de Fundão em sedimentos marinhos é avaliada a partir da razão entre o valor de susceptibilidade magnética medida nas amostras ao longo do Monitoramento e o valor de referência, conforme Orlando *et al.* (2020). A presença do sinal do rejeito da Barragem de Fundão é estabelecida quando ocorre um aumento de 20% (1,2 vezes) em relação ao valor de referência, como explicado por Orlando *et al.* (2020).

Quanto ao indicador IMS (*Iron Mineralogical Set*) foi com base na técnica de SRXRD que se determinou a presença de conjunto mineralógico de ferro (IMS) que tem a assinatura mineralógica da fonte e sua abundância relativa; e o conjunto mineralógico de carbonatos, silicatos, hidróxido de alumínio e outros minerais não ferrosos (CSMS). Assim, O IMS (%) é o marcador da presença de rejeito de minério de ferro no sedimento.

As análises aqui descritas foram realizadas no laboratório de Nanometria Fotônica da UFES.

2.2.6 Análise estatística

Foi realizado o Teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para determinar se as séries de dados possuem tendência temporal de alteração estatisticamente significativa (p -valor $< 0,05$), utilizando o software PAST - Palaeontological Statistics. Por tratar-se de um método não paramétrico, ele não requer distribuição normal dos dados (Yue *et al.*, 2002).

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

A partir do Ano 2, a análise de susceptibilidade magnética passou a integrar as análises mineralógicas. Nesse mesmo período, o equipamento LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry), utilizado para medir concentração e diâmetro de partículas em suspensão) deixou de ser empregado.

A partir da campanha de agosto/2022 (Ano 4) onde iniciou-se o Novo Ciclo, ocorreram outras alterações metodológicas relevantes:

- As amostras de sedimento de fundo destinadas às análises de granulometria do Tema Bentos de Fundos Inconsolidados deixaram de ser coletadas e analisadas nesse âmbito;
- Os Temas Sedimentologia e Mapeamento de Habitats passaram a ser tratados conjuntamente sob a nomenclatura Sedimentação Marinha;
- A coleta e análise de testemunhos foi retirada do escopo do projeto, uma vez que as análises realizadas até então já evidenciaram o acúmulo de MLD nos diferentes pontos de coleta (conforme apresentado neste material suplementar). O monitoramento da presença ou ausência de MLD permanece sendo realizado no sedimento superficial.

2.4 ALTERAÇÕES NA MALHA/FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADOS EM OUTUBRO DE 2024: SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES.

Ainda conforme mencionado no item 1, no âmbito da Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024, o Tema de Sedimentação Marinha passou por uma alteração com a exclusão da macroatividade de Mapeamento de Habitat. Com isso, todas as seções do relatório relacionadas a essa macroatividade estarão suprimidas, incluindo metodologia, resultados e considerações finais.

O tema mapeamento de habitats foi planejado para atender a necessidade de ampliar o conhecimento sobre o fundo marinho potencialmente afetado pelo material ligado ao desastre, sendo seus produtos e resultados utilizados pelos demais temas como base para caracterização do ambiente. Este indicador era responsável por apontar a distribuição, estrutura e integridade de habitats no fundo marinho, principalmente a extensão de substratos rígidos e tridimensionais, que ao longo do monitoramento, mostrou regiões vulneráveis na plataforma, como os fundos de rodólitos e bioconstruções nas regiões APA/Rio Doce.

A continuidade do mapeamento foi retirada por decisão da CTBio, já que o mapeamento de habitats não necessariamente tinha indicadores diretos sobre onexo causal, mas sustentava uma base ecossistêmica que nenhum outro tema do PMBA realiza. A decisão foi por um critério estabelecido, e não porque o mapeamento não deu resultado. O mapeamento gerou uma base de dados inédita como mapeamento de mais de mil estruturas recifais ao largo de São Mateus, mapeou pela primeira vez estruturas lineares como bancos transversais na foz do Rio Doce, sendo que muitos desses bancos suportam fundos de rodólitos, mapeou 100% o fundo da APA Costa das Algas, mostrando a paisagem

submarina, a importância dos canais como habitats mais profundos na plataforma e o extenso banco de rodolitos. Na APA, foi ainda mapeado pela primeira vez mais de 2000 depressões circulares que suportam uma alta biodiversidade que não vem sendo estudada pelo PMBA ou por outros pesquisadores. Da mesma maneira, a morfologia do fundo adjacente à foz do Rio Doce mostrou uma série de feições erosivas que indicam claramente que o material depositado pode ser transportado em direção offshore.

Considerando uma abordagem de gestão baseada no ecossistema, o principal impacto da interrupção do mapeamento de habitats é a ausência do conhecimento sobre o fundo marinho, o que prejudica a implementação de ações voltadas aos ambientes mais vulneráveis. O conhecimento em alta resolução dos habitats é importante para entender o potencial risco e vulnerabilidade da paisagem submarina, tais como padrões de distribuição de regiões vulneráveis em termos de estruturas recifais e presença de rodolitos ao longo da região estudada. O grande prejuízo é o mapeamento da área adjacente à Degredo e em direção norte, justamente uma área onde há um alto impacto ambiental, tanto que o tema Marinho Integrado aumentou sua amostragem. Os habitats marinhos nesta região ainda não foram mapeados em alta resolução, logo essa interrupção é uma perda significativa para o entendimento da paisagem submarina e a biodiversidade associada.

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 como se segue:

3.1 MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA (% MO)

Figura 1: **(A)** Vazões medianas mensais (m^3/s) do rio Doce. **(B)** Carga de sedimento em suspensão total mensal (QSS - ton/mês) do rio Doce. Os dados foram coletados na estação P21 em Linhares (Ambiente Dulcícola - PMBA/Fest-UFES) e representam o período do Ano 1 (barra preta; outubro de 2018 a setembro de 2019), do Ano 2 (barra cinza; outubro de 2019 a setembro de 2020), do Ano 3 (barra azul escuro; outubro de 2020 a setembro de 2021), Ano 4 (barra azul; outubro de 2021 a setembro de 2022), do Ano 5 (barra verde; outubro de 2022 a setembro de 2023), do Ano 6 (barra laranja; outubro de 2023 a setembro de 2024) e do Ano 7 (barra vinho; outubro de 2024 a março de 2025) PMBA/Fest-UFES.

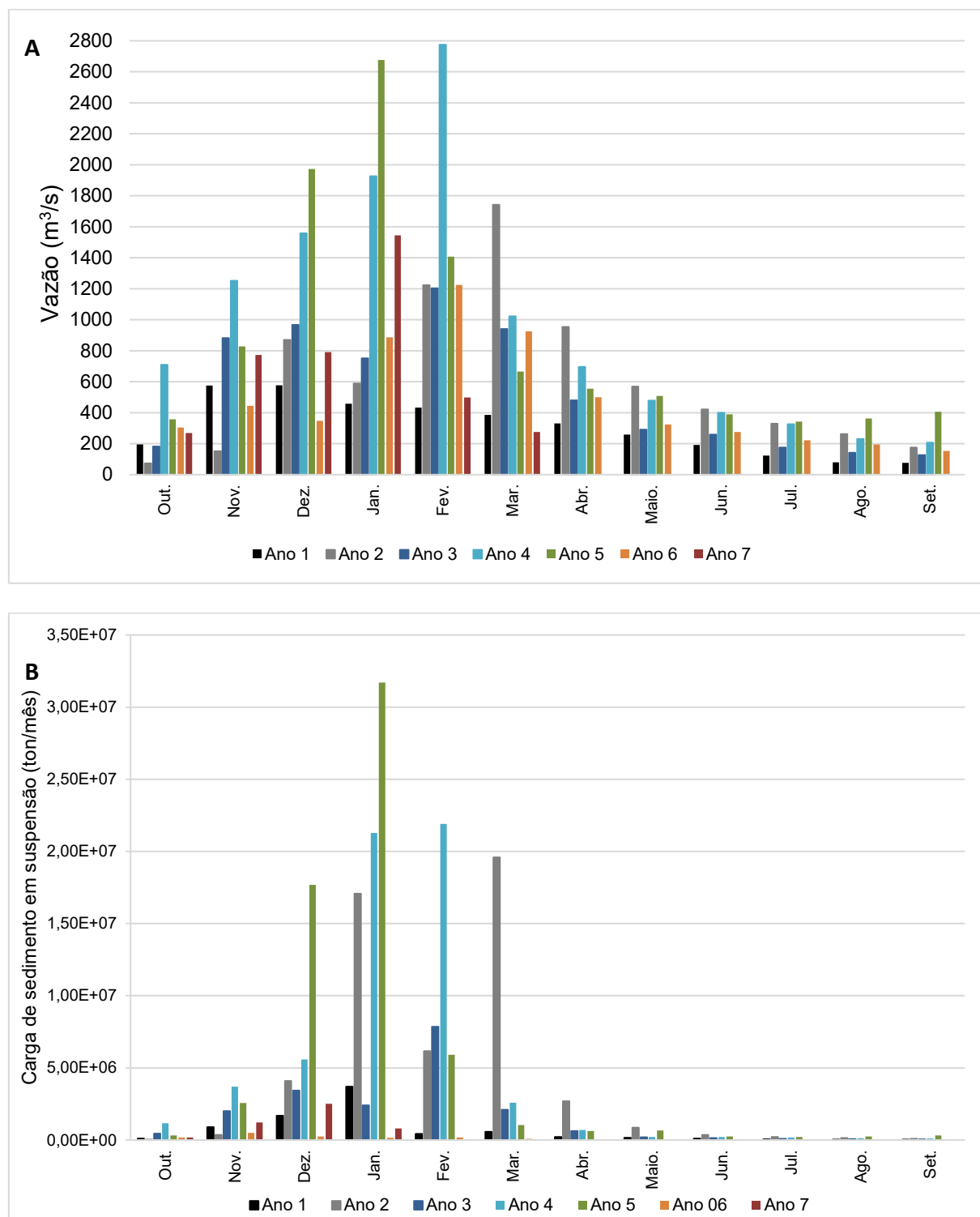


Figura 2: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS; caixas vermelhas) e teor de matéria orgânica (MO; caixas azuis) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Abrolhos. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022), e não ocorreram mais coletas para esse setor devido a uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais o setor.

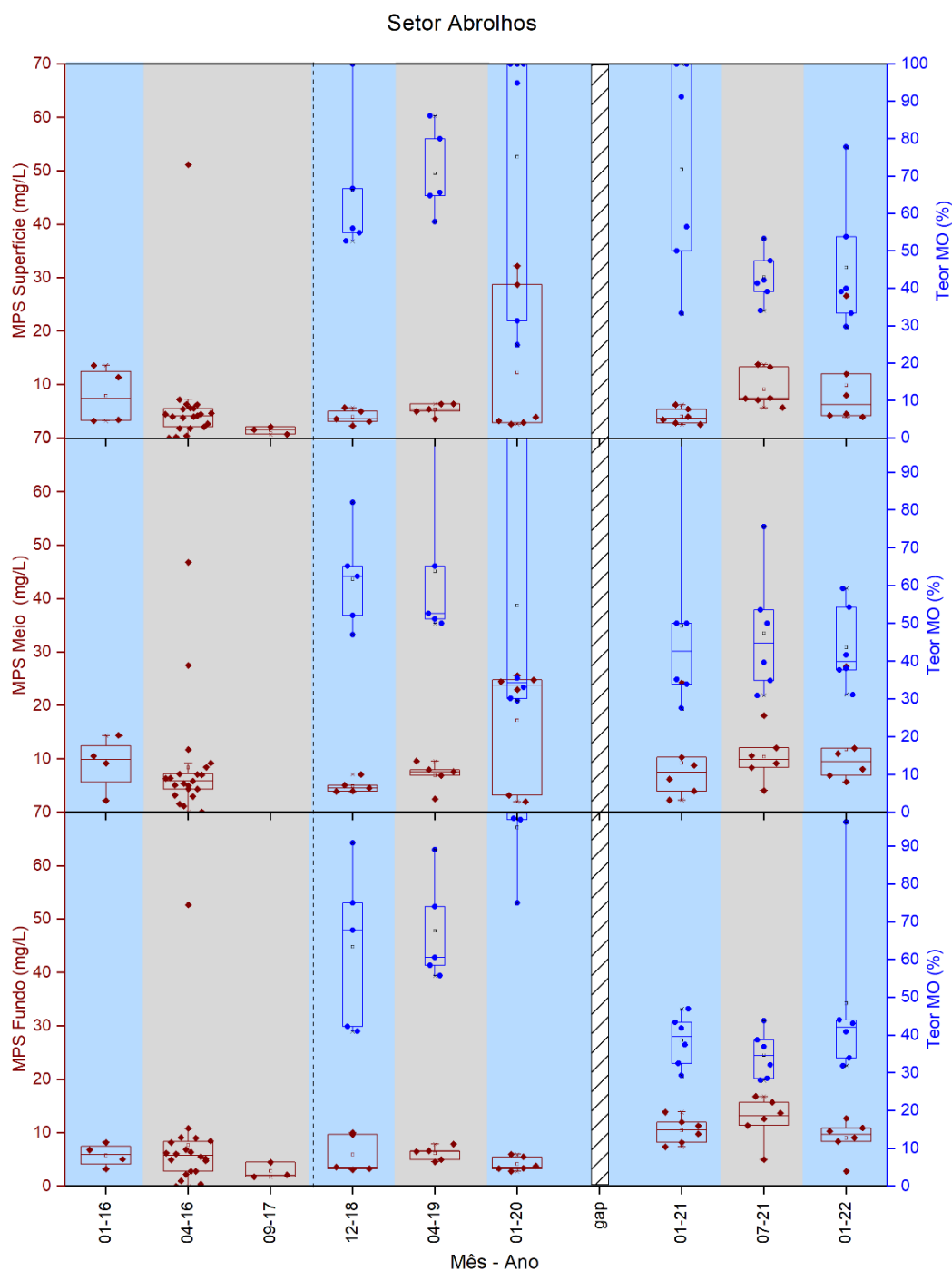
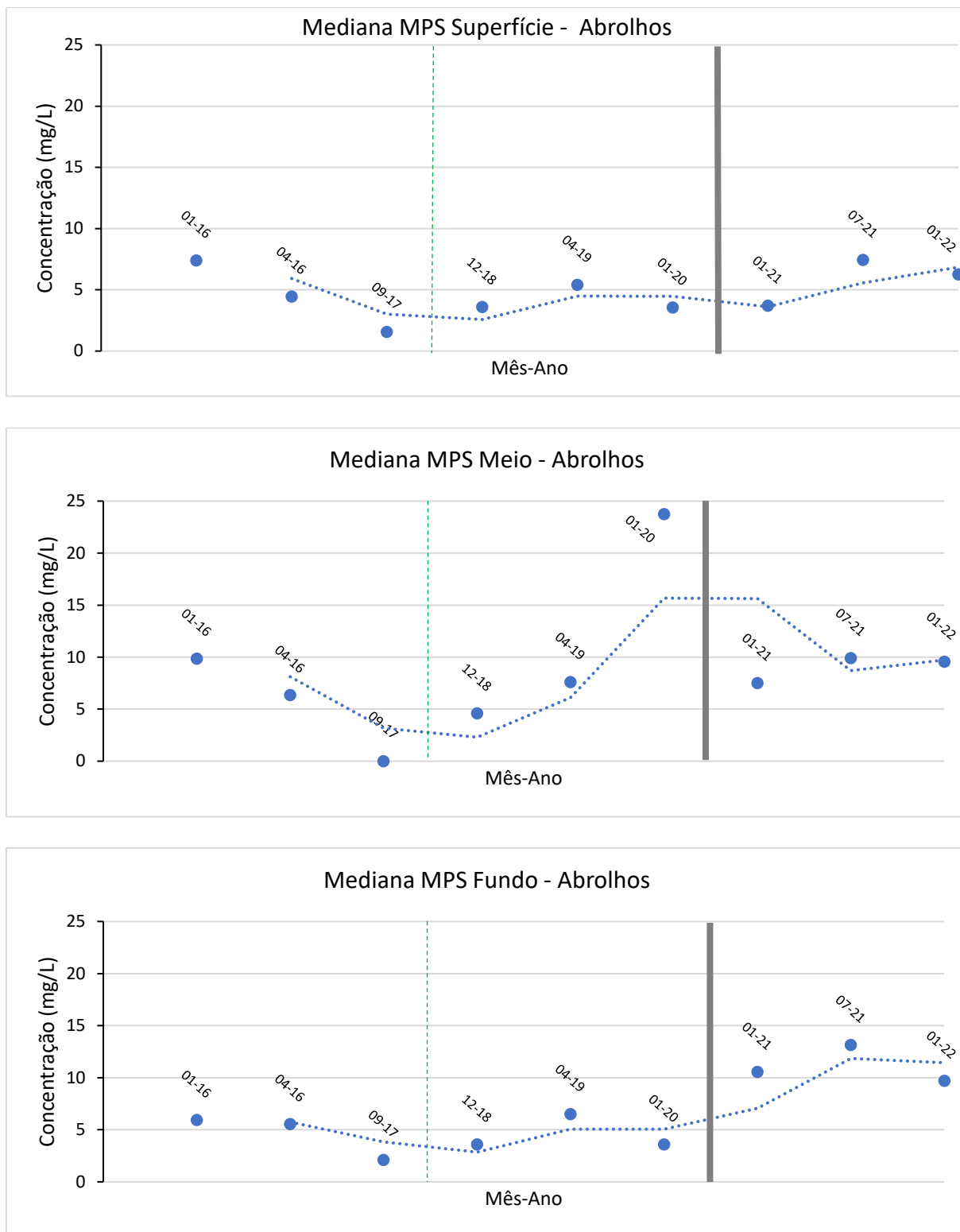


Figura 3: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Abrolhos. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Não ocorreram coletas para esse setor a partir de 01/22 devido a uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais o setor.



O Setor Abrolhos mostrou influência dos eventos hidrológicos dos rios que ali deságuam, assim o aumento das concentrações de MPS foi observado durante ou logo após chuvas de moderada a forte intensidade no centro – norte do Espírito Santo e sul da Bahia. A Figura 2 e a Figura 3 mostram que o Setor Abrolhos apresentou as maiores concentrações de MPS para as profundidades Superfície e Meio no Ano 2 e Ano 4, enquanto as maiores concentrações de MPS próximo ao fundo (Fundo) foram observados no Ano 3 (julho de 2021). As maiores concentrações de MPS na superfície e meio da coluna d'água no Ano 2 e 4 decorrem do fato dos meses mais chuvosos terem sido dezembro de 2019, janeiro 2020 (Ano 2), dezembro de 2021 e janeiro de 2022 (Ano 4), quando comparados aos meses de dezembro de 2018, janeiro de 2019 (Ano 1), dezembro de 2020 e janeiro de 2021 (Ano 3), para todo centro – norte do Espírito Santo e sul da Bahia.

Figura 4: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS; caixas vermelhas) e teor de matéria orgânica (MO; caixas azuis) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos vermelhos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.

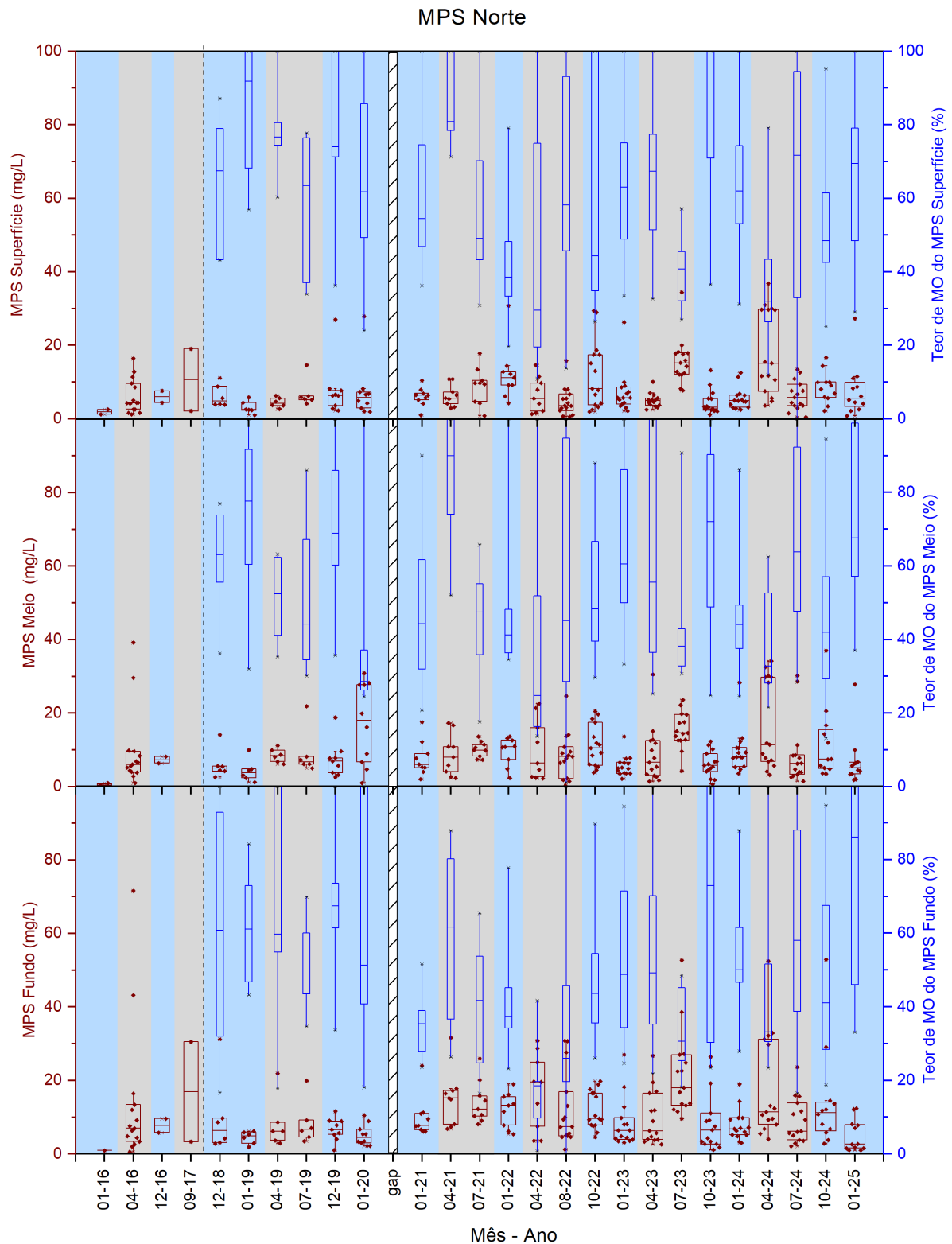
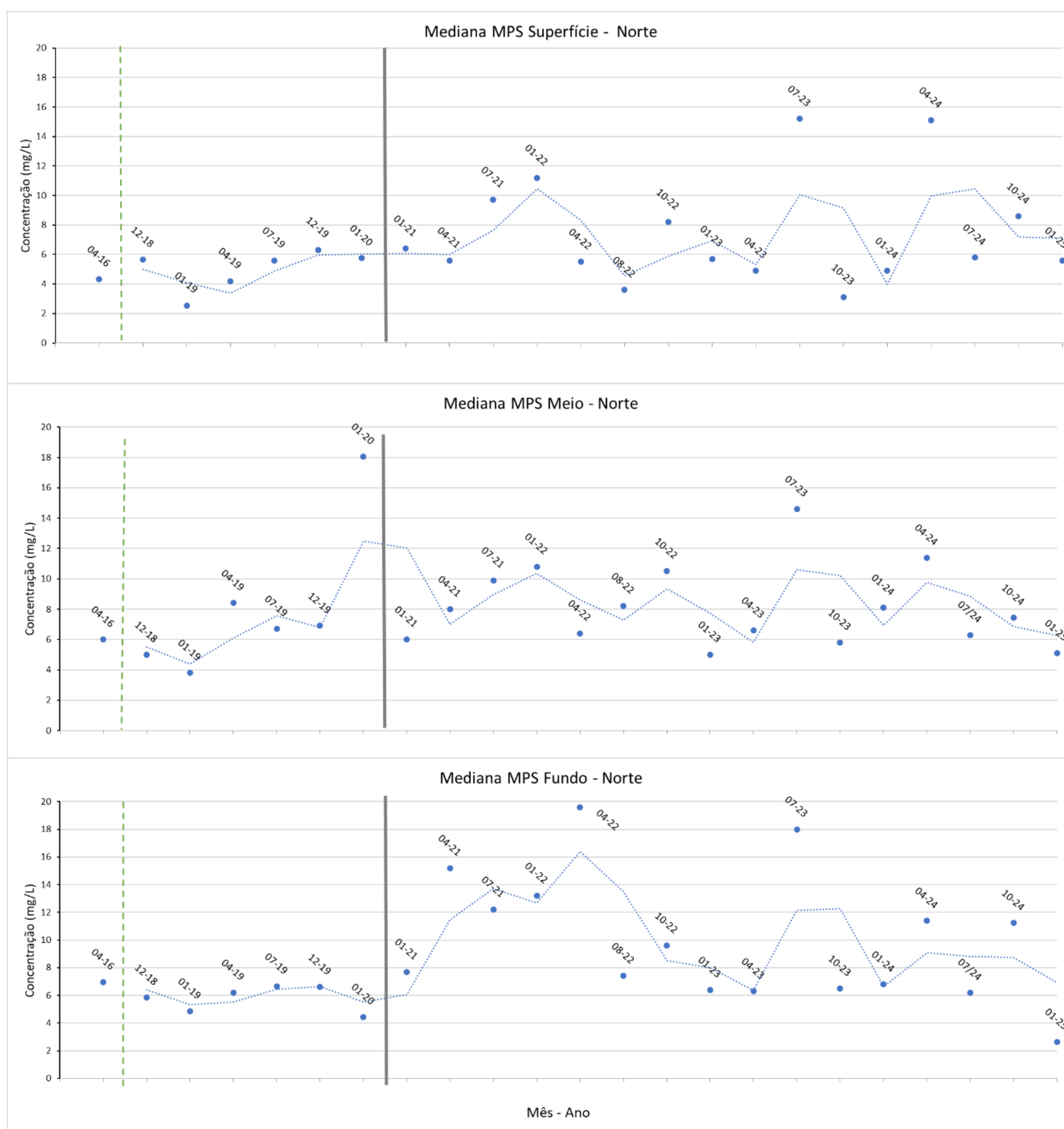


Figura 5: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Norte. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.



Observou-se uma tendência crescente estatisticamente significativa do MPS no setor Norte (p -valor $< 0,05$). Assim como no Ano 5, no período seco do Ano 6 foram registradas concentrações de MPS superiores às do período chuvoso do mesmo ano, associadas à diminuição do teor de Matéria Orgânica (MO) no MPS (Figura 4). Seguindo o mesmo padrão observamos no período chuvoso do Ano 7, concentrações de MPS inferiores às dos períodos secos dos Anos 5 e 6 associados a um aumento de teor de MO. Os valores superficiais de MPS foram superiores aos do período chuvoso do ano 6. Registrou-se elevação nas concentrações de MPS junto ao fundo em outubro/24, contrastando com os valores obtidos durante os períodos chuvosos dos anos 5 e 6 (Figura 6). Esses resultados destacam, no setor Norte, a influência dos eventos de ressuspensão de sedimentos do fundo marinho, evidenciada pela variação espaço-temporal das concentrações de MPS e do teor de MO no MPS.

Figura 6: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na (A) superfície, (B) meio e (C) fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Os limites superiores para os eixos Y são diferentes entre cada profundidade da coluna d'água e para parte da série de dados (dados em vermelho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

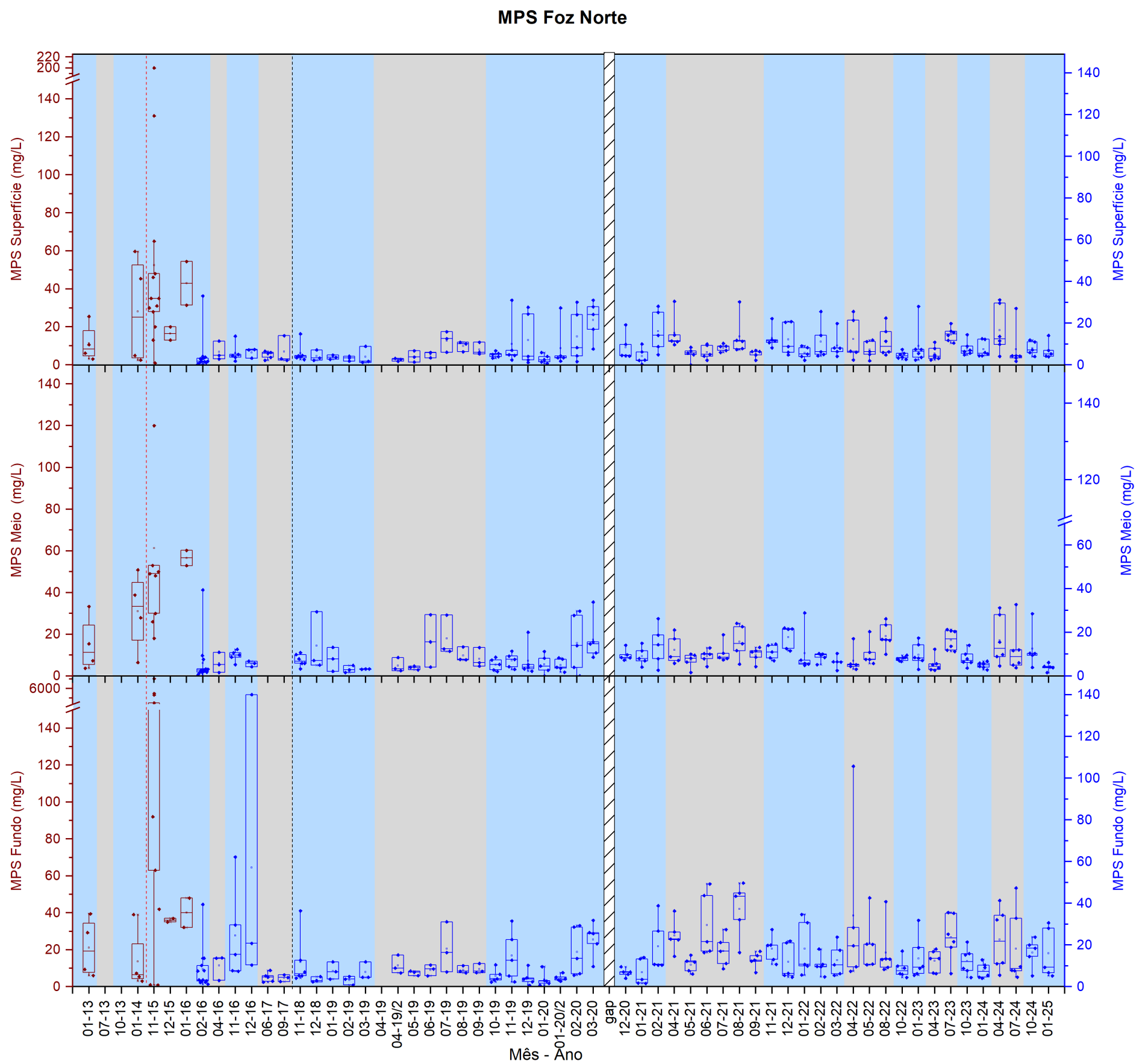


Figura 7: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Foz Norte desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

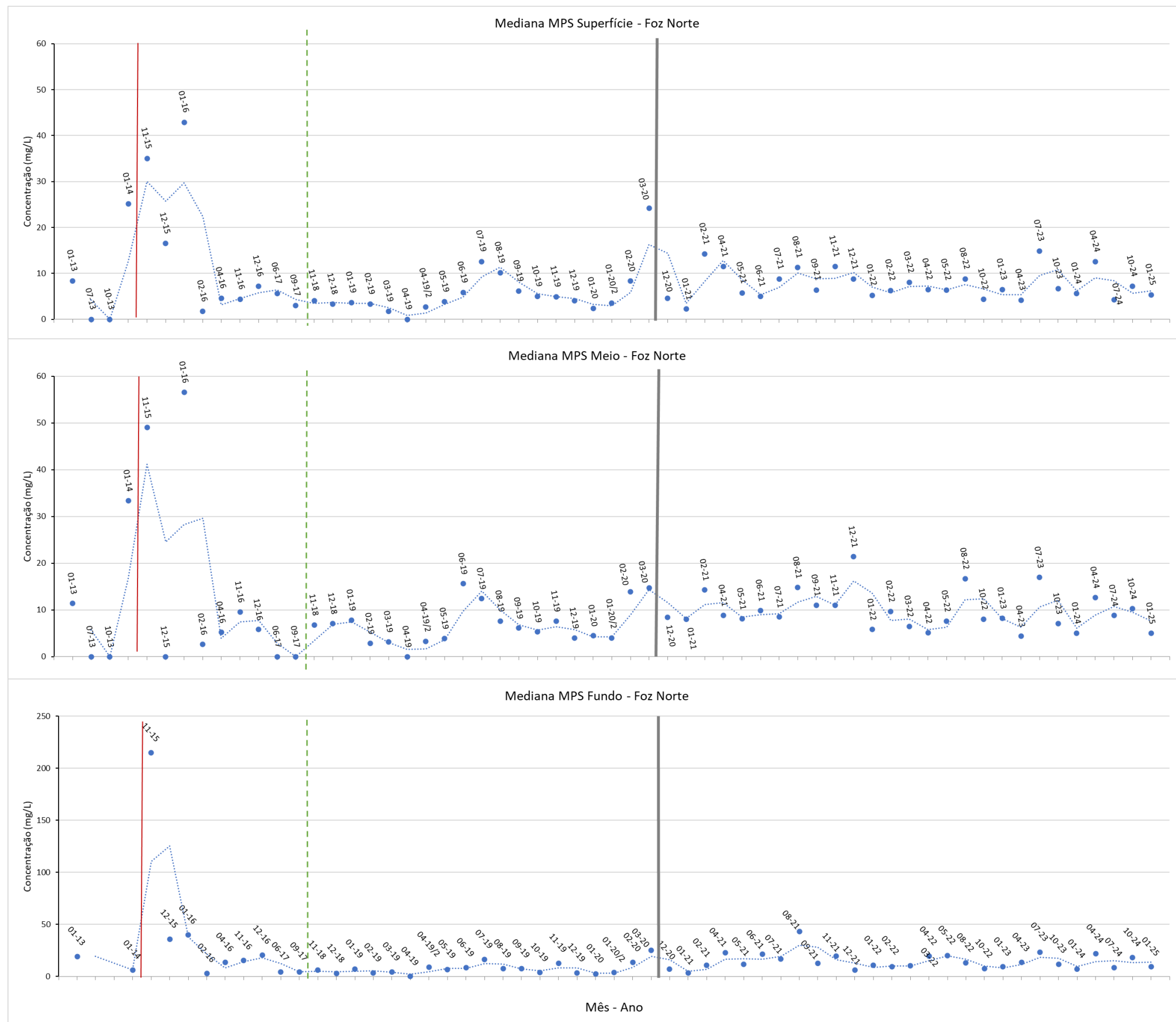
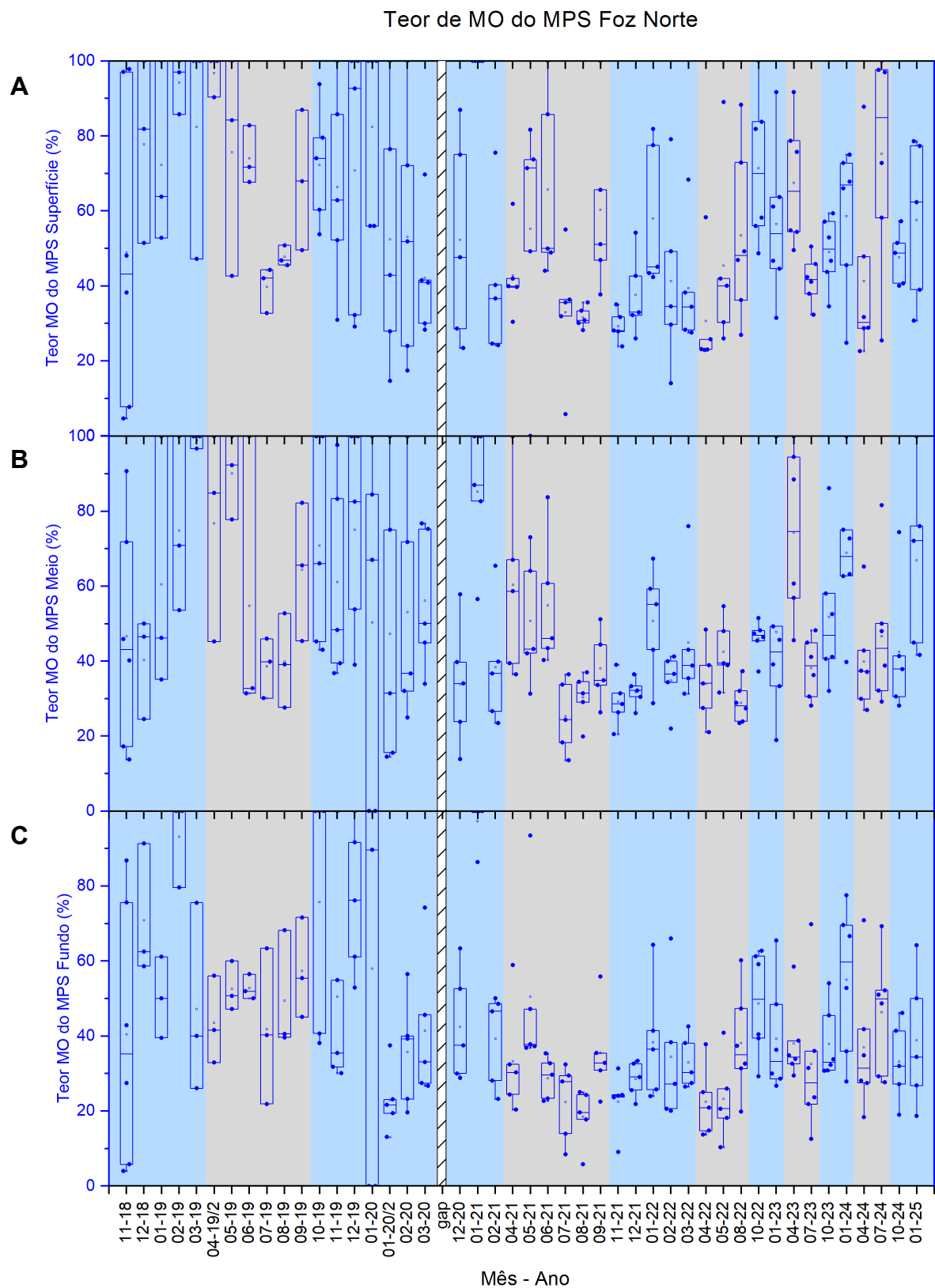


Figura 8: **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m acima do fundo) da coluna d'água para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.



As condições combinadas de vazão do rio Doce e os padrões de vento sobre a plataforma continental são fatores determinantes no comportamento espaço-temporal das concentrações de material particulado em suspensão (MPS) neste setor. O aumento na concentração de MPS associado a condições específicas de vento favorece a dispersão desse material na coluna d'água. Para a Foz Norte, essa dispersão ocorre predominantemente durante eventos de ventos provenientes do quadrante sul.

Conforme ilustrado na Figura 1, ao longo do PMBA/Fest-UFES, o comportamento da vazão do rio Doce apresentou uma tendência próxima à climatologia descrita por Oliveira e Quaresma (2017). Observou-se um aumento das vazões máximas diárias e da mediana mensal no período chuvoso, entre os meses de outubro e março, e uma redução no período seco, que ocorre de abril a setembro (Oliveira e Quaresma, 2017).

Dados pretéritos do setor Foz Norte indicam concentrações elevadas de MPS na superfície e meio em janeiro de 2014 (Figura 6), associadas à cheia histórica do rio Doce. Os demais valores de concentração de MPS permanecem dentro da variabilidade natural sazonal. Vale destacar que, em janeiro de 2014, as concentrações de MPS junto ao fundo apresentaram valores relativamente baixos, o que é característico em situações em que a maior parte do MPS é transportada nas camadas média e superficial da coluna d'água. Entretanto, após o rompimento da barragem e a chegada do material de lama de dragagem (MLD) na foz, durante um período de grande seca no rio Doce, observou-se uma alta concentração de MLD dispersa nas camadas mais profundas (Quaresma *et al.*, 2020).

Durante o PMBA/Fest-UFES, os maiores valores de vazão foram registrados em janeiro do Ano 2 (5179 m³/s) e em janeiro de 2022, no Ano 4 (5595 m³/s), dados obtidos da estação P21, em Linhares (Tema – Integração Fluvio-Estuarina/ PMBA/Fest-UFES). No setor Foz Norte observamos na camada superficial da coluna D'água baixos valores nas concentrações de Material Particulado em Suspensão (MPS) ao longo de todo monitoramento, e com discretos aumentos nos períodos secos (evidenciando que a dispersão de sedimentos ocorre predominantemente durante eventos de ventos provenientes do quadrante sul). Para as camadas intermediária e próximo ao fundo observamos o padrão sazonal de maiores valores de MPS nos períodos secos.

No Ano 6 (outubro de 2023 a setembro de 2024), as vazões fluviais apresentaram valores baixos, comparáveis às condições hidrológicas observadas no Ano 1 do monitoramento (Figura 1). Essa redução resultou nas menores cargas de sedimentos em suspensão já registradas ao longo do monitoramento. Contudo, no Ano 6, as concentrações de MPS foram mais elevadas (Figura 6) durante o período seco em comparação ao período chuvoso, especialmente na campanha de abril de 2024, associadas a uma redução no teor de matéria orgânica nesse período (Figura 8). Similar ao Ano 6, o período chuvoso do Ano 7 manteve vazões significativamente baixas. Na análise do material particulado em suspensão (MPS) no setor Foz Norte do Rio Doce, observou-se que o período chuvoso do Ano 7 manteve concentrações similares às do Ano 6 nas camadas superficial e intermediária da coluna d'água. Contudo, registraram-se valores significativamente mais elevados no fundo.

Paralelamente, detectou-se uma redução no teor de MO na camada de fundo do Ano 7 (janeiro de 2025 com 30,6% de MO no MPS) em relação ao mesmo período do ano 6 (janeiro de 2024 com 66,6% de MO no MPS).

O padrão sazonal caracterizado por maiores concentrações no período seco (associado a frentes frias e eventos meteo-oceanográficos) permaneceu evidente. Entretanto, as medianas do período chuvoso do Ano 7 superaram as do Ano 6 em toda a coluna d'água (superfície, meio e fundo). Esse padrão pode estar associado a alterações nos processos de ressuspensão sedimentar ou a mudanças no regime hidrológico local. Além disso, as concentrações de MPS no Setor Foz Norte (Figura 6), para todas as profundidades, apresentaram tendência de aumento significativo (p -valor < 0,05) ao longo do período do monitoramento.

Figura 9: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Os limites superiores para os eixos Y são diferentes para cada profundidade da coluna d'água e para parte da série de dados (dados em vermelho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

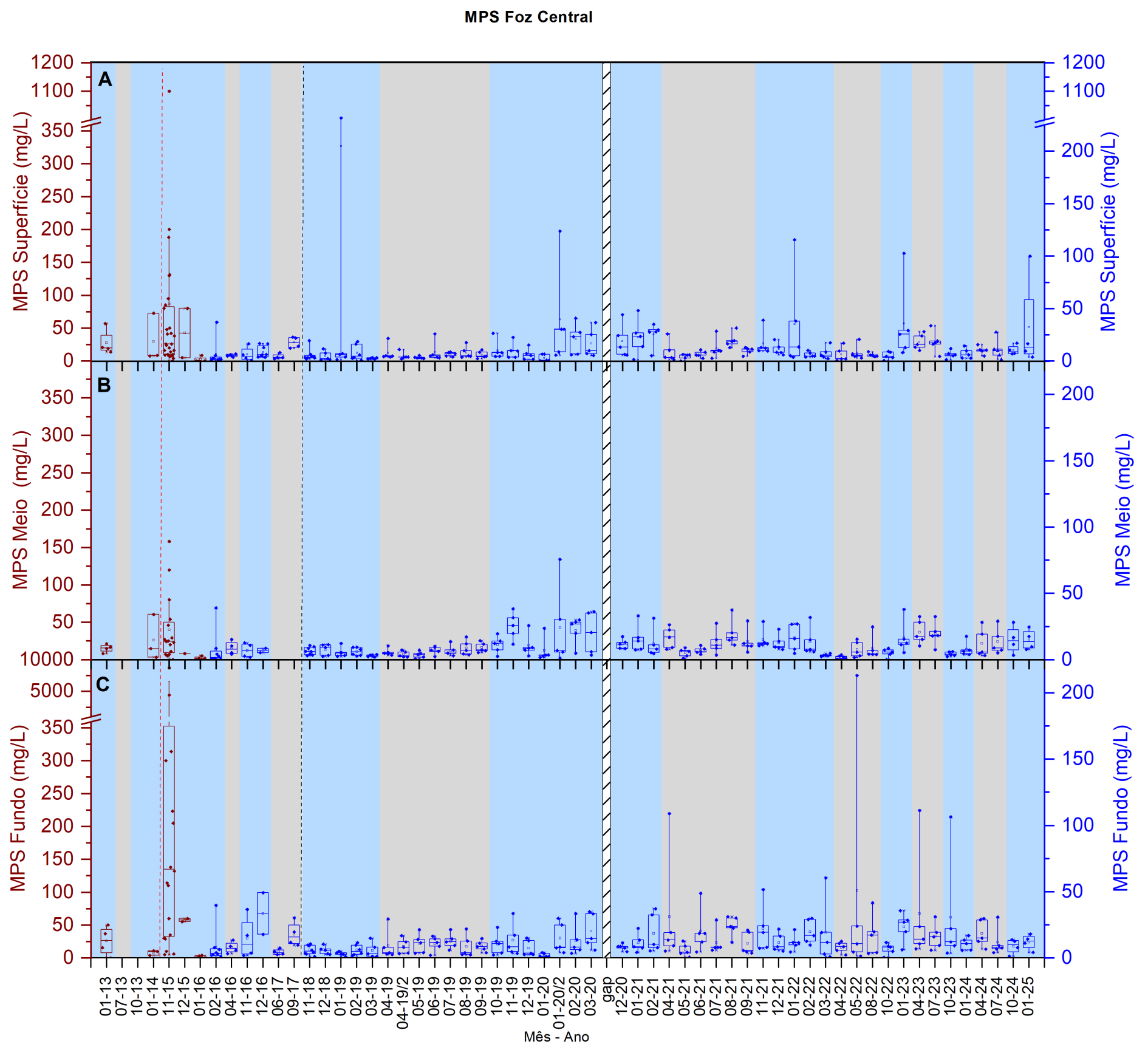


Figura 10: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície, meio e fundo da coluna d'água, para o Setor Foz Central desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

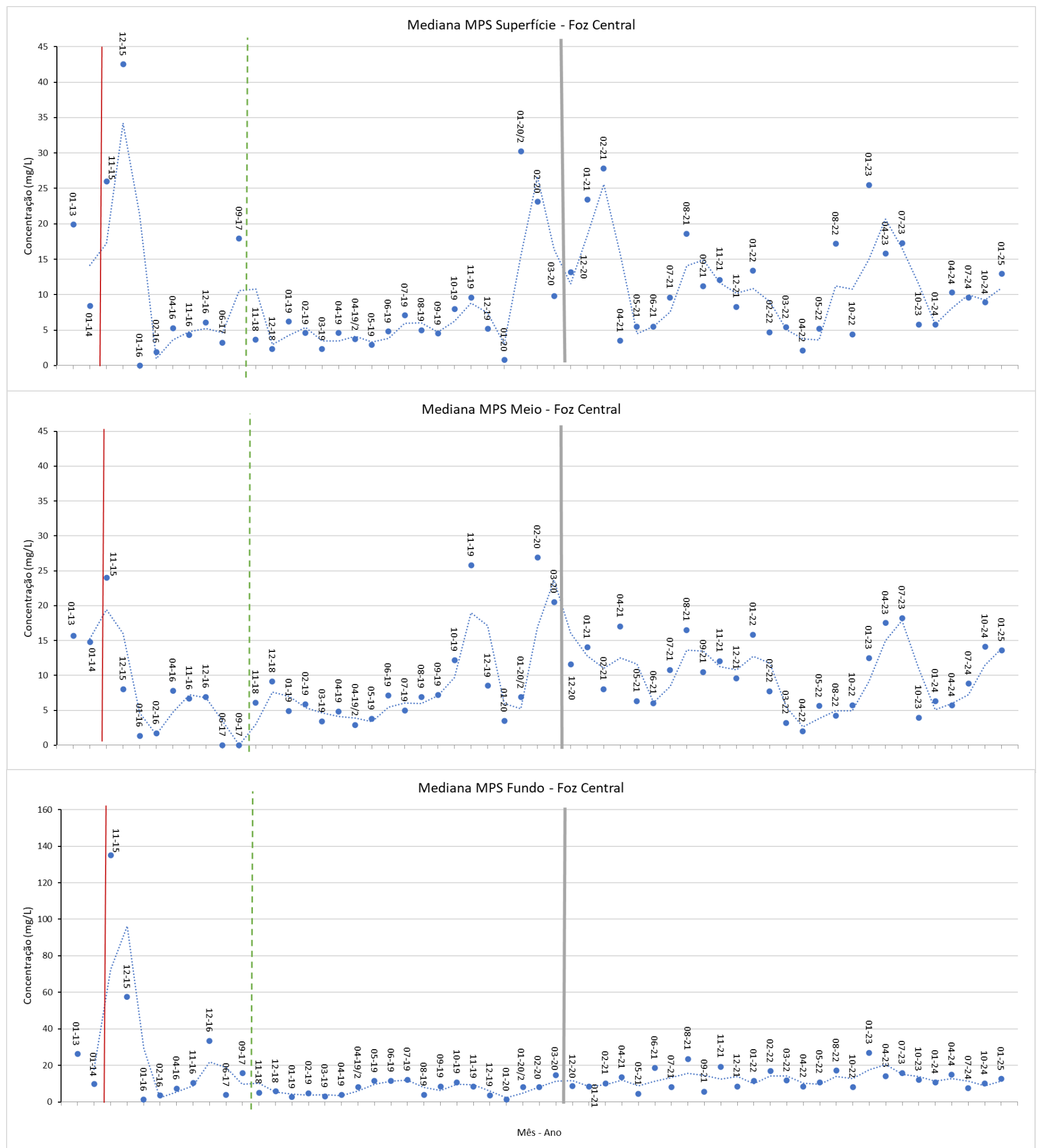
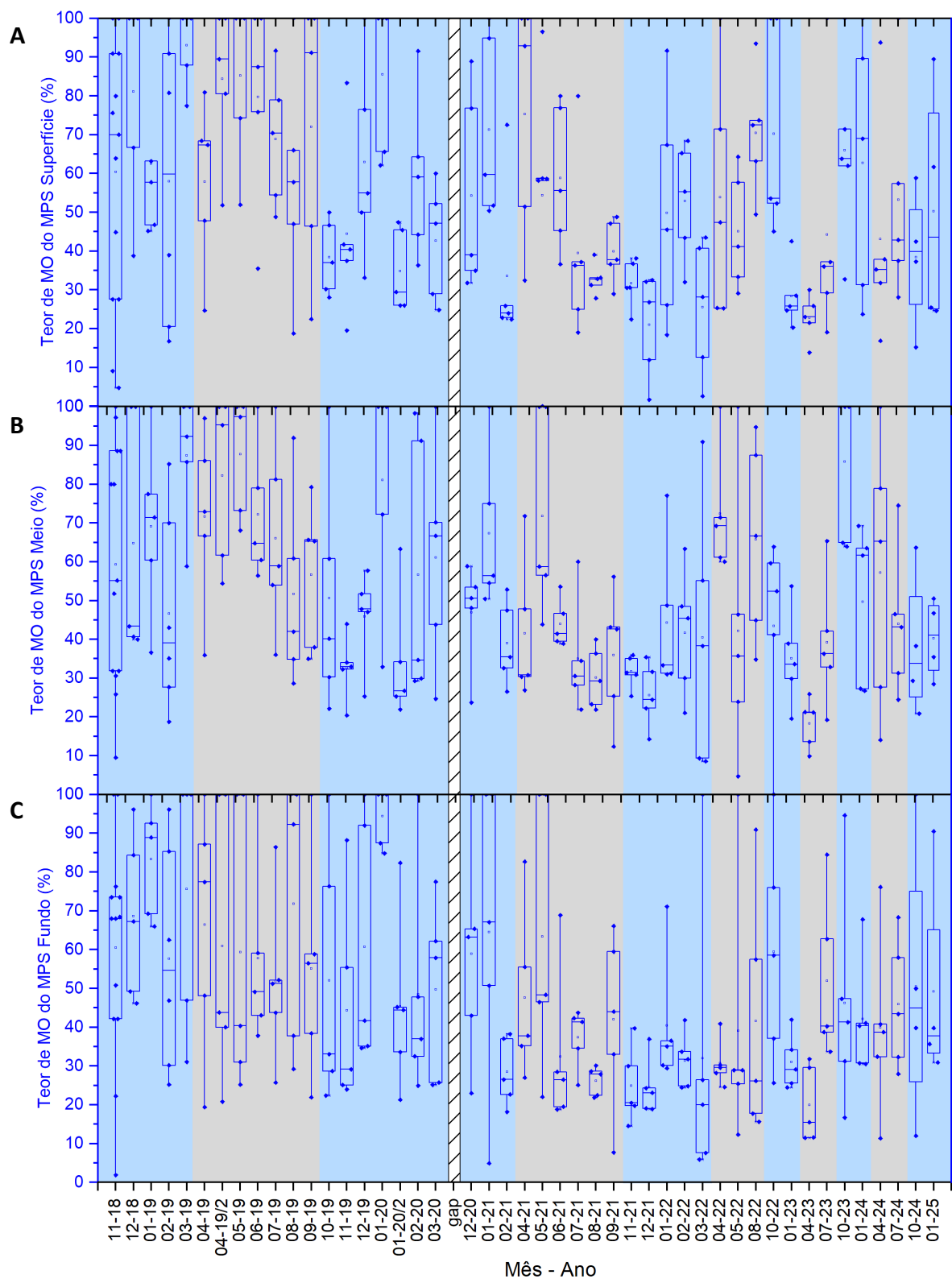


Figura 11: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.

Teor de MO do MPS Foz Central



As concentrações de MPS no Setor Central (Figura 9 a Figura 11) apresentaram uma tendência de aumento significativo (p -valor $< 0,05$) ao longo do período de monitoramento, para todas as profundidades da coluna d'água. Esse padrão indicou maiores concentrações de MPS na superfície da coluna d'água durante o período chuvoso, associado ao aporte fluvial, e no fundo da coluna d'água durante os períodos secos, devido à ressuspensão do sedimento do fundo. Esses resultados evidenciam a influência direta das condições hidro-meteoceanográficas sobre a dinâmica do MPS na região da foz.

As concentrações de MPS foram mais altas nos Anos 2 e 4, mas no Ano 5 houve um aumento das medianas de MPS tanto na superfície quanto no fundo da coluna d'água (Figura 10). Esse aumento pode ser atribuído ao maior aporte de sedimentos em suspensão proveniente do rio Doce entre dezembro de 2022 e janeiro de 2023 (Figura 1), refletindo a influência do aporte fluvial sobre as concentrações de MPS nesse setor. Um exemplo representativo disso ocorreu durante a campanha de janeiro de 2022, que foi realizada logo após o pico do evento hidrológico de cheia, registrado no dia 13 de janeiro de 2022, com uma vazão máxima de 5595 m³/s na estação P21, em Linhares (Tema – Integração Fluvio-Estuarina/ PMBA/Fest-UFES). Nesse mesmo dia, a carga de sedimento em suspensão atingiu 1,5 x 10⁵ toneladas/dia.

Durante o período chuvoso do Ano 4, a concentração de MPS (Figura 9) na estação SD 01 (superfície da coluna d'água) atingiu 115 mg/L, enquanto no Ano 5, o valor foi de 102 mg/L na mesma estação e profundidade, indicando a continuidade do comportamento do MPS. Nos Anos 6 e 7, por outro lado, as concentrações de MPS foram inferiores aos valores observados no ano 5 em todos os estratos da coluna d'água, refletindo a redução da carga de sedimentos em suspensão registrada ao longo desse período. Esse comportamento evidencia a variação das concentrações de MPS de acordo com as condições hidrológicas e sedimentares, reforçando o papel significativo do aporte fluvial e da ressuspensão nos processos dinâmicos do MPS na região da foz do rio Doce.

Na foz central do rio Doce, o período chuvoso do Ano 7 registrou aumento nas concentrações de material particulado em suspensão (MPS) em comparação ao mesmo período do Ano 6, com pico de 99 mg/L no ponto SD 01 – valor equivalente ao observado no Ano 5 nessa mesma estação. No entanto o comportamento geral continua apresentando valores inferiores aos anos 2, 4 e 5. Além disso, houve redução no percentual de matéria orgânica (MO) associada ao MPS nas camadas superficial e intermediária da coluna d'água em relação ao período chuvoso do Ano 6.

Figura 12: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Os limites superiores para os eixos Y são diferentes entre para cada profundidade da coluna d'água e para parte da série de dados (dados em vermelho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

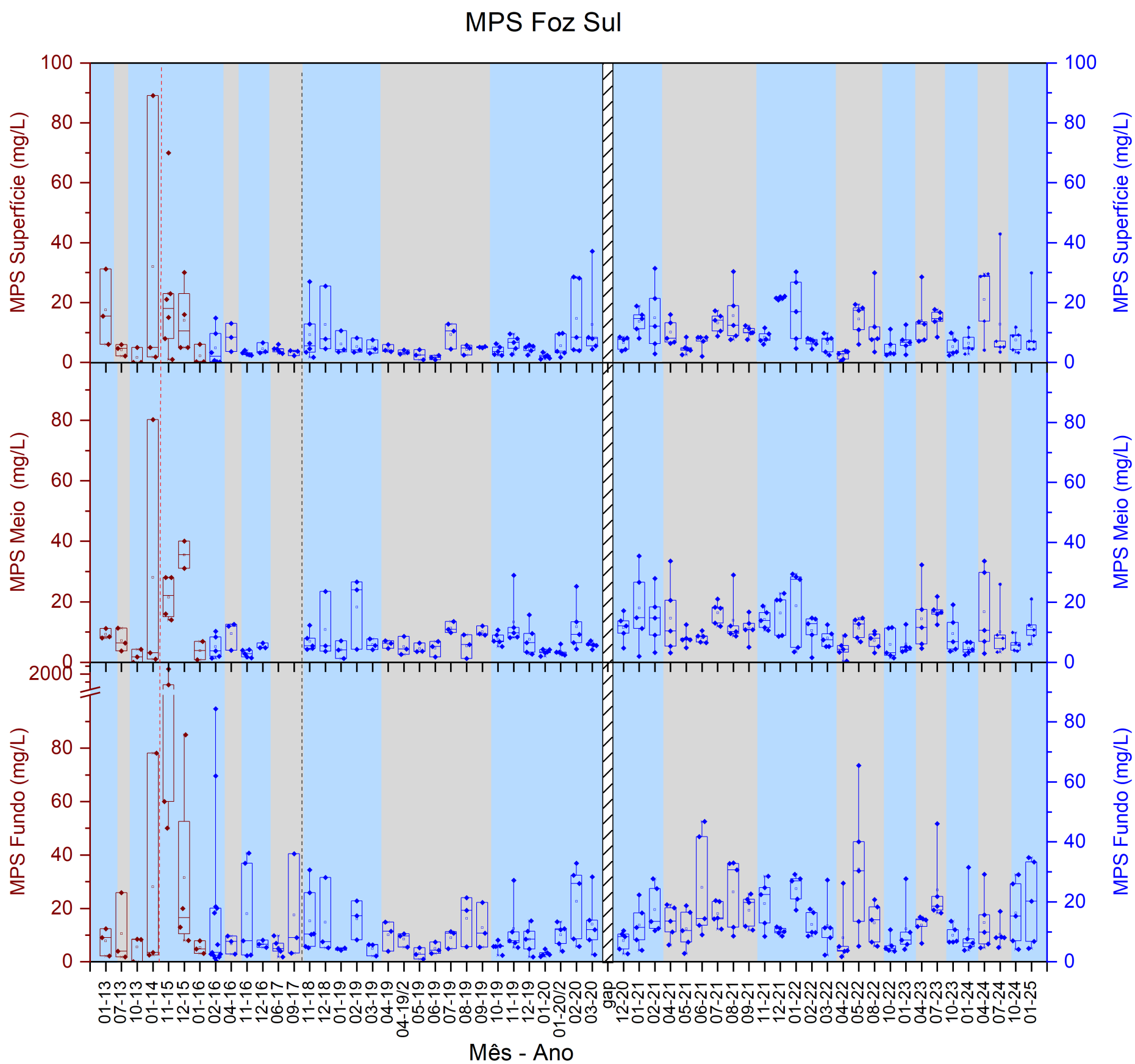


Figura 13: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície, meio e fundo da coluna d'água, para o Setor Foz Sul desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de Fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

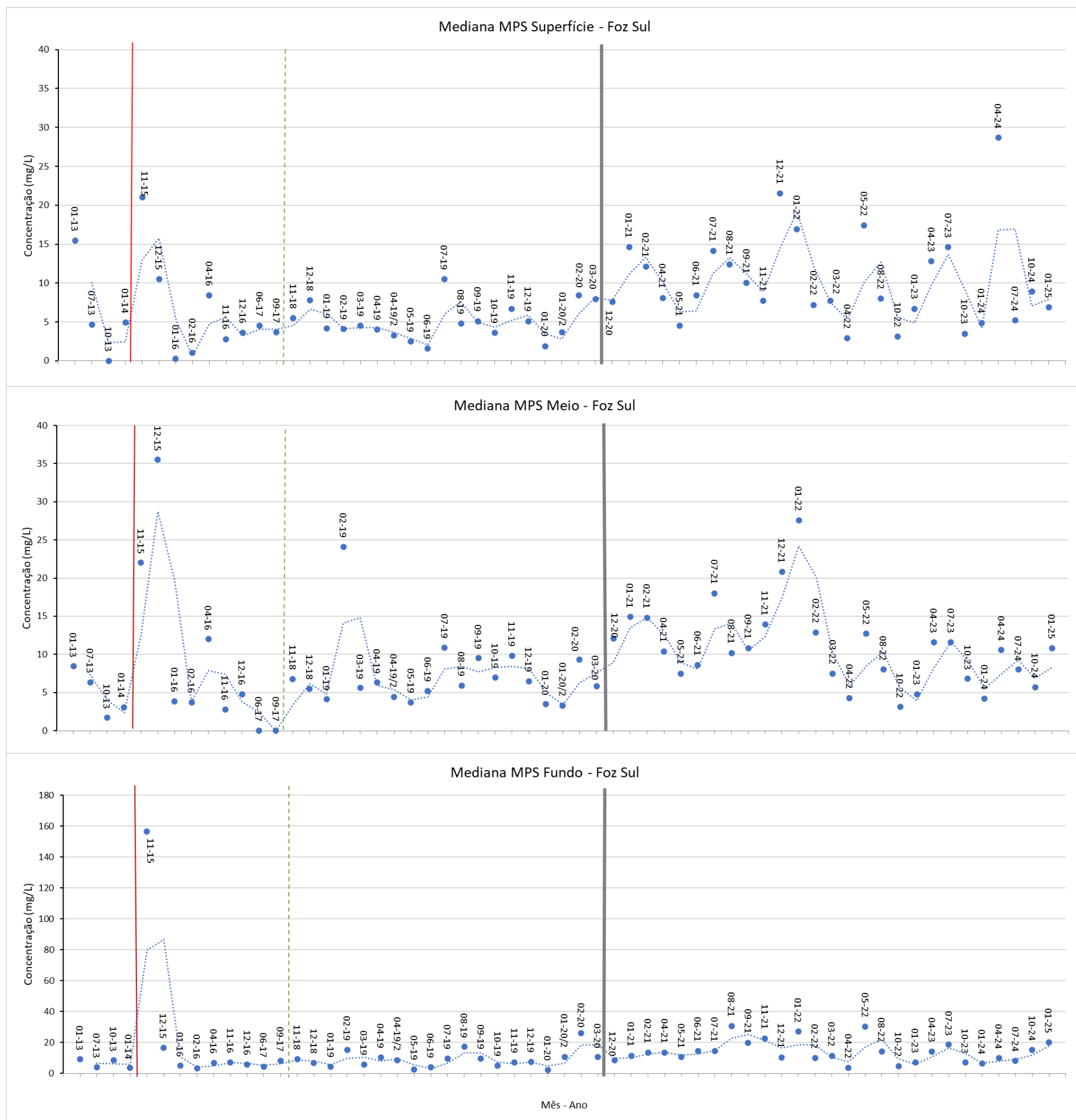
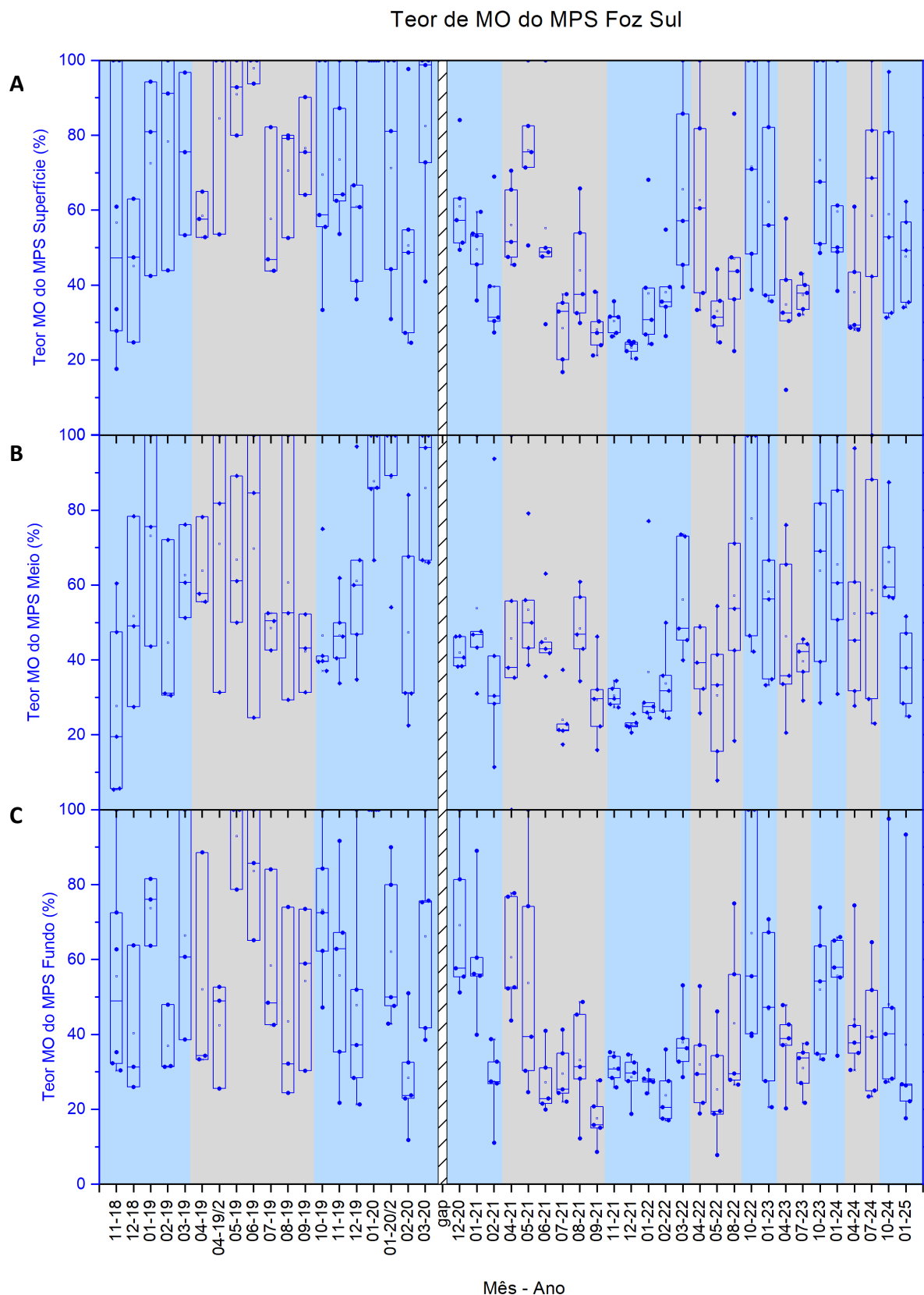


Figura 14: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.



O Setor Foz Sul é marcado pelo depocentro (Quaresma *et al.*, 2015), ou seja, área onde ocorre o maior acúmulo de sedimento terrígeno aportado pelo rio Doce. Observando a série temporal de MPS, verifica-se que, neste setor, há um aumento na variabilidade das concentrações de MPS após o evento de rompimento da barragem, se estendendo ao longo de todo o monitoramento, principalmente nos dados medidos junto ao Fundo e Meio da coluna d'água.

As concentrações de MPS para o Setor Foz Sul (Figura 12 a Figura 14) também apresentam uma tendência de aumento significativo ($p\text{-valor} < 0,05$) ao longo do período de monitoramento. No período seco dos Anos 5 e 6, verificou-se um aumento das concentrações de MPS em todos os estratos da coluna d'água. Destaque para a campanha de abril de 2024 (Ano 6), na qual as medianas das concentrações de MPS na superfície apresentaram os maiores valores registrados ao longo do monitoramento para esse estrato da coluna d'água. Esse aumento foi acompanhado de uma redução no teor de matéria orgânica no MPS (Figura 14), resultando em valores de concentrações superiores aos observados nos períodos chuvosos dos anos correspondentes.

Embora o comportamento das concentrações de MPS no período chuvoso, a partir do Ano 5, continuem refletindo a influência direta das condições hidro-meteoceanográficas, observa-se uma redução nas medianas das concentrações de MPS durante os Anos 5 e 6, quando comparado ao ano 4. Para o período chuvoso do Ano 7 observou-se um aumento nas concentrações de material particulado em suspensão (MPS) em toda a coluna d'água em comparação ao mesmo período do Ano 5 e 6, com destaque para a camada de fundo, onde os valores se aproximaram de 20 mg/L. Paralelamente, observou-se uma redução no percentual de matéria orgânica (MO) associada ao MPS em todas as profundidades em relação ao período chuvoso do Anos 5 e 6.

Figura 15: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. As estações rasas estão localizadas mais próximas à costa até 36 m de profundidade e as estações profundas estão localizadas a partir de 36 m até cerca de 55m de profundidade. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Não há dados pretéritos de MPS para esse setor. Dados em vermelho correspondem às estações Rasas. Dados em azul correspondem às estações Profundas. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral.

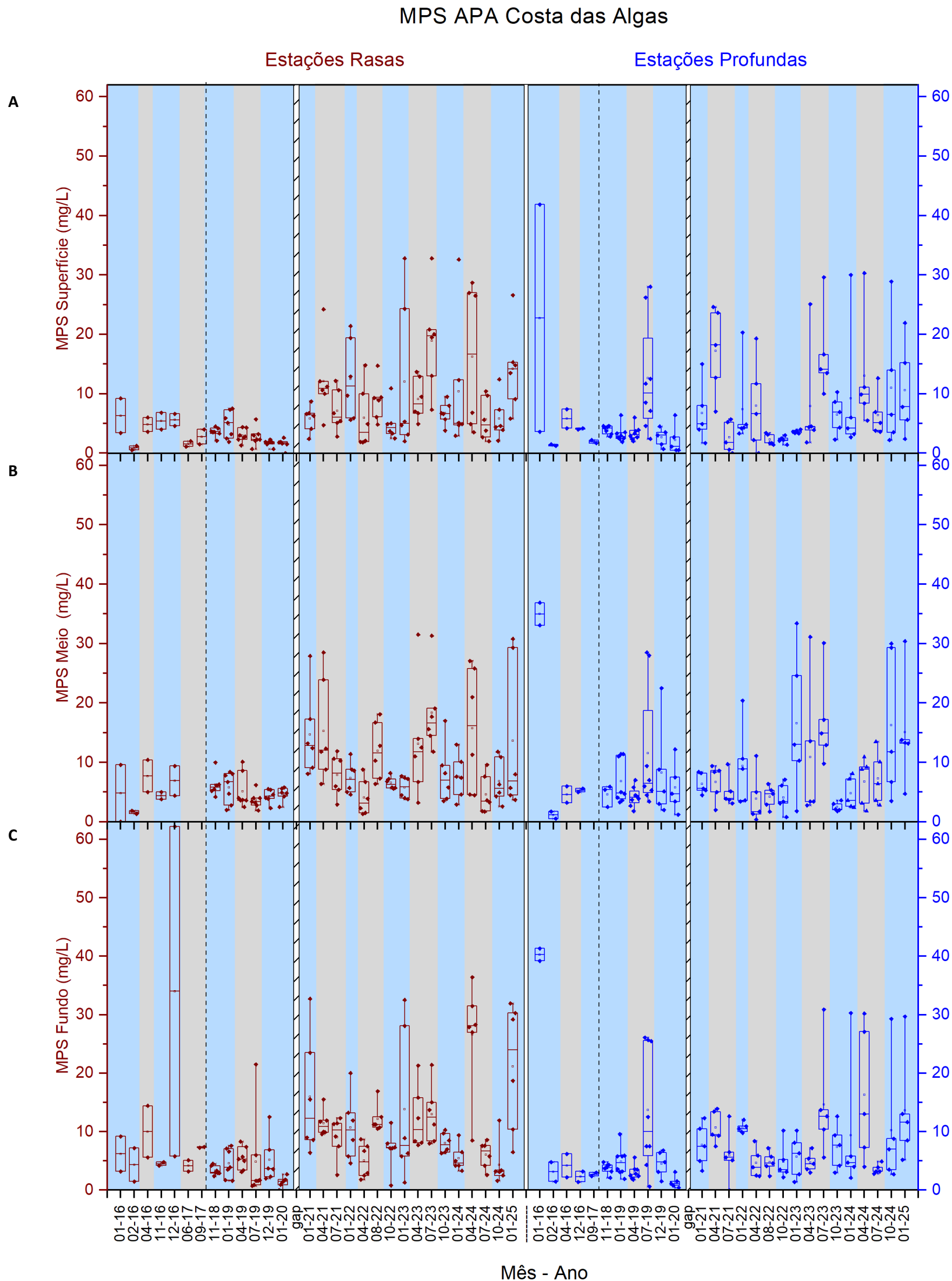


Figura 16: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície, meio e fundo da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

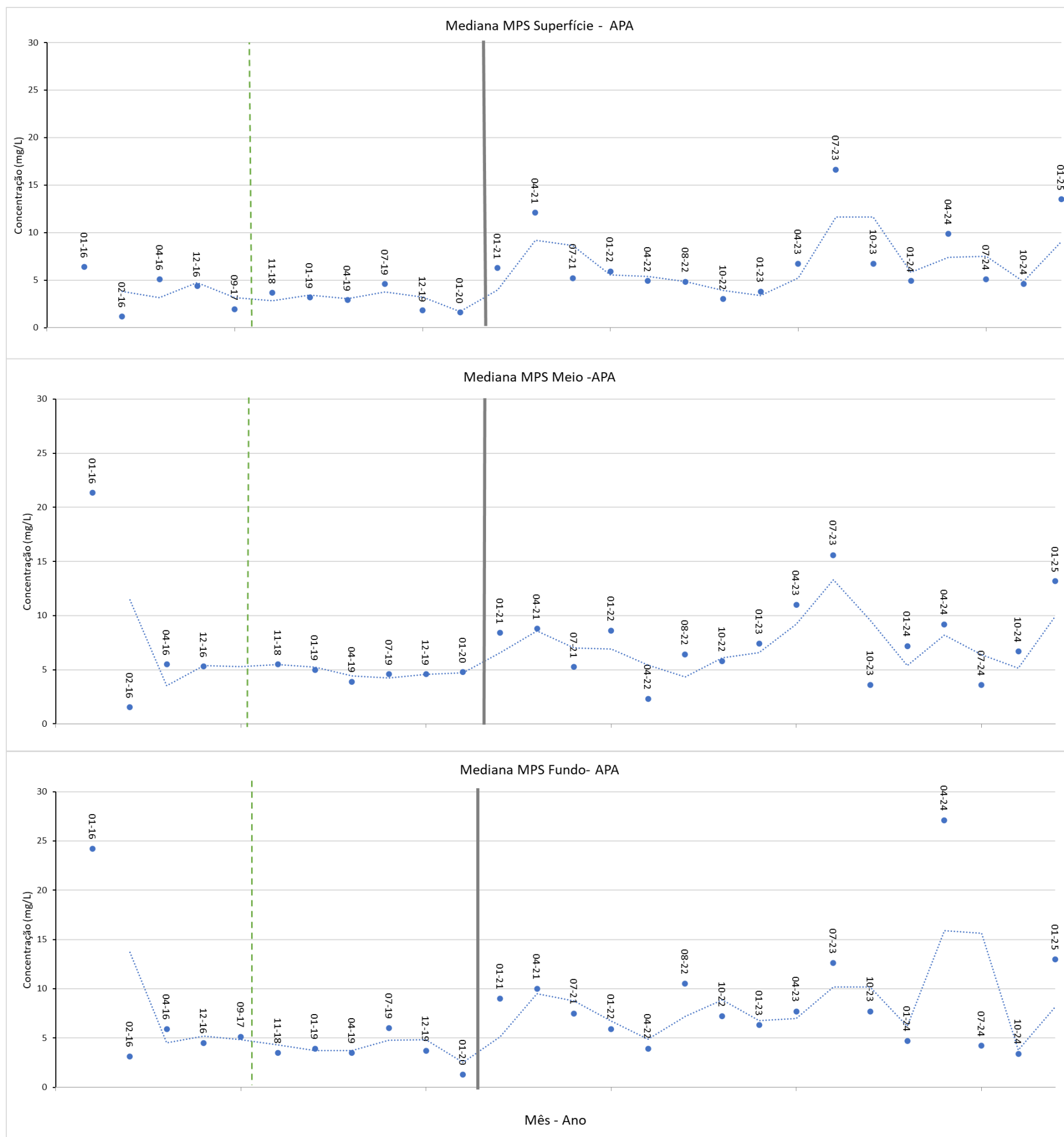
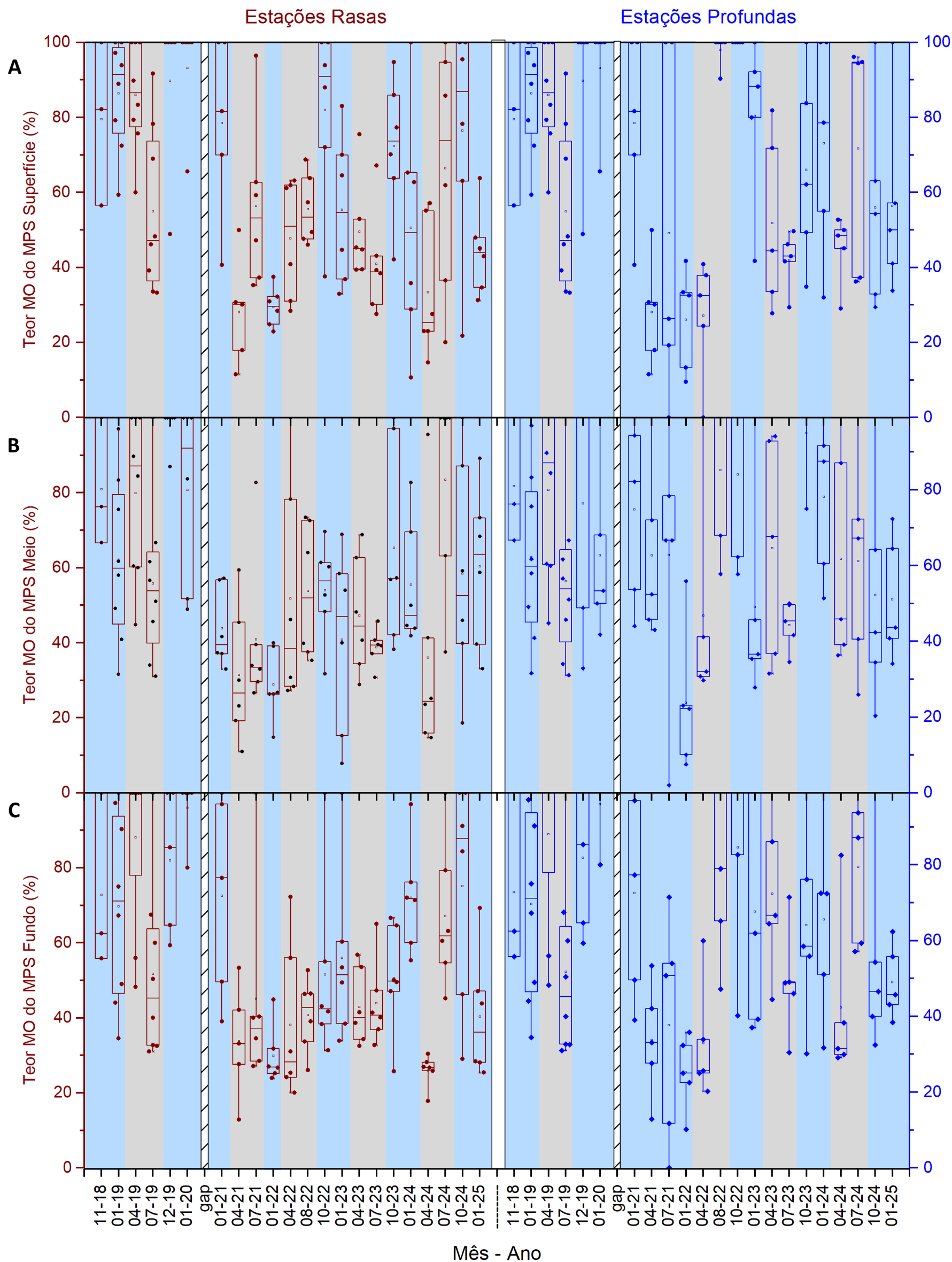


Figura 17: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas na (A) superfície, (B) meio e (C) fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. As estações rasas estão localizadas mais próximas à costa até 36 m de profundidade e as estações profundas estão localizadas a partir de 36 m até cerca de 55m de profundidade. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Não há dados pretéritos de teor de MO do MPS para esse setor. Dados em vermelho correspondem às estações Rasas. Dados em azul correspondem às estações Profundas. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral.

Teor de MO do MPS APA Costa das Algas



Nas estações APA Rasa (até 36m) foi observado um aumento significativo (p -valor < 0,05) das concentrações de MPS ao longo do período do Monitoramento (Figura 15 e Figura 17). Nas estações APA profunda (36m<profundidade<55m) não foi observado esse padrão. Como discutido por estudos prévios e em relatórios anteriores, no Setor APA Costa das Algas a concentração de MPS é fortemente influenciada pelo material exportado pelo rio Doce durante condições conjuntas de eventos de cheia e ventos do quadrante norte (Oliveira, 2018; RRDM, 2021; Quaresma *et al.*, 2021). As maiores concentrações de MPS para as estações rasas ocorreram no período chuvoso do Ano 5 e no período seco do Ano 6. Dessa forma, no Ano 6, assim como no setor Foz Sul, ocorreu um aumento das concentrações de MPS no período seco em relação ao período chuvoso desse mesmo ano. Além disso, na campanha de abril de 2024 (Ano 6), o fundo da coluna d'água apresentou a maior mediana de concentração de sedimentos em suspensão registrada ao longo de todo o período do monitoramento.

Para o período chuvoso do Ano 7 observou-se concentrações mais elevadas de MPS em comparação ao mesmo período do Ano 6, tanto na região profunda (APA Profunda) quanto na rasa (APA Rasa). Enquanto as medianas do percentual de matéria orgânica (% MO) mantiveram-se estáveis nos pontos da APA Rasa, observou-se redução significativa na % MO na APA Profunda durante o período chuvoso do Ano 7 em relação ao ano anterior.

3.2 POTENCIAL DE MOBILIDADE DO SEDIMENTO SUPERFICIAL DE FUNDO

Figura 18: Percentual de Mobilidade do sedimento superficial (base) ao longo do PMBA/Fest-UFES, para os setores Foz Norte, Foz Central e Foz Sul. Áreas em azul indicam o período chuvoso e em cinza, o período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

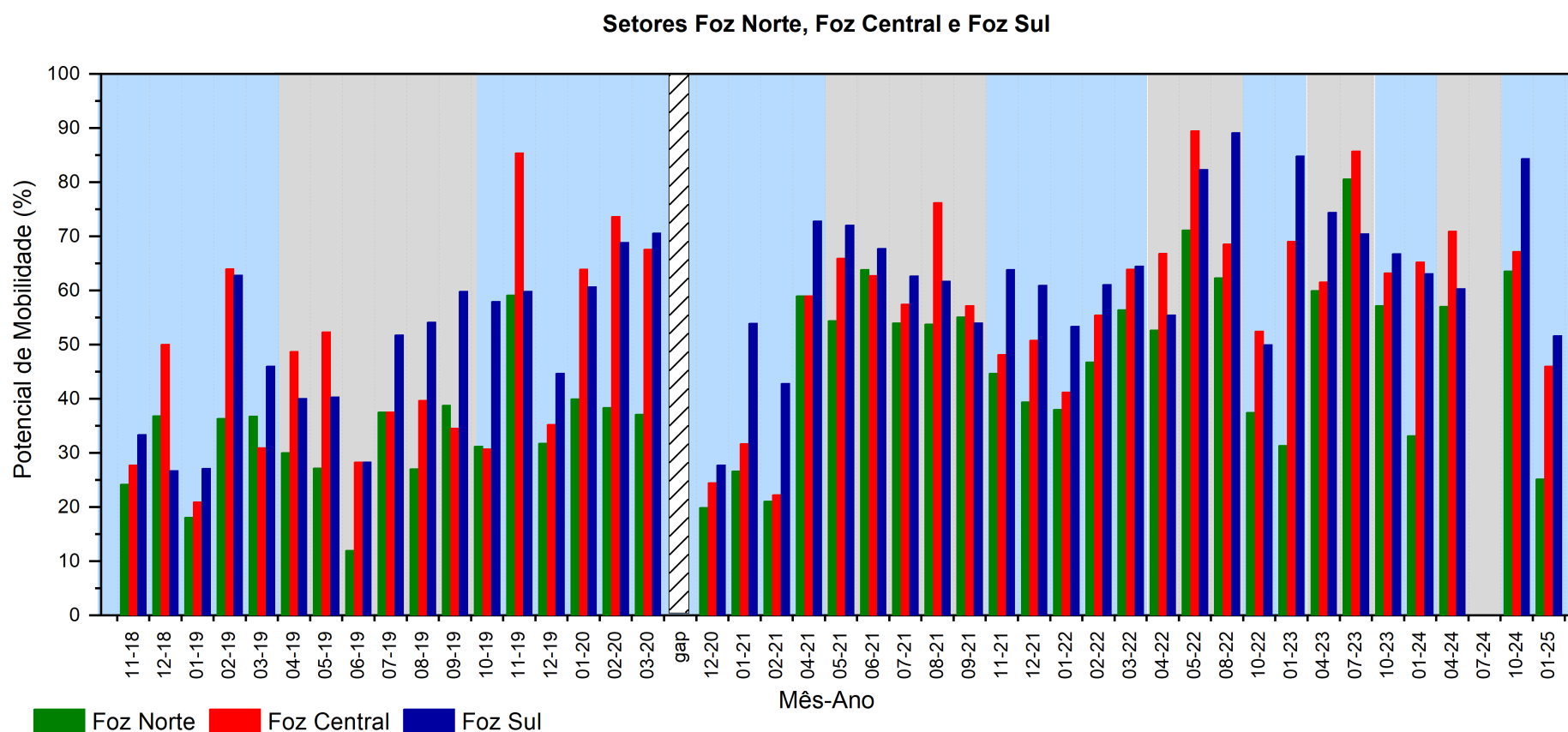


Figura 19: Percentual de Mobilidade do sedimento superficial (base) ao longo do PMBA/Fest-UFES, para o setor Norte. Áreas em azul indicam o período chuvoso e em cinza, o período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

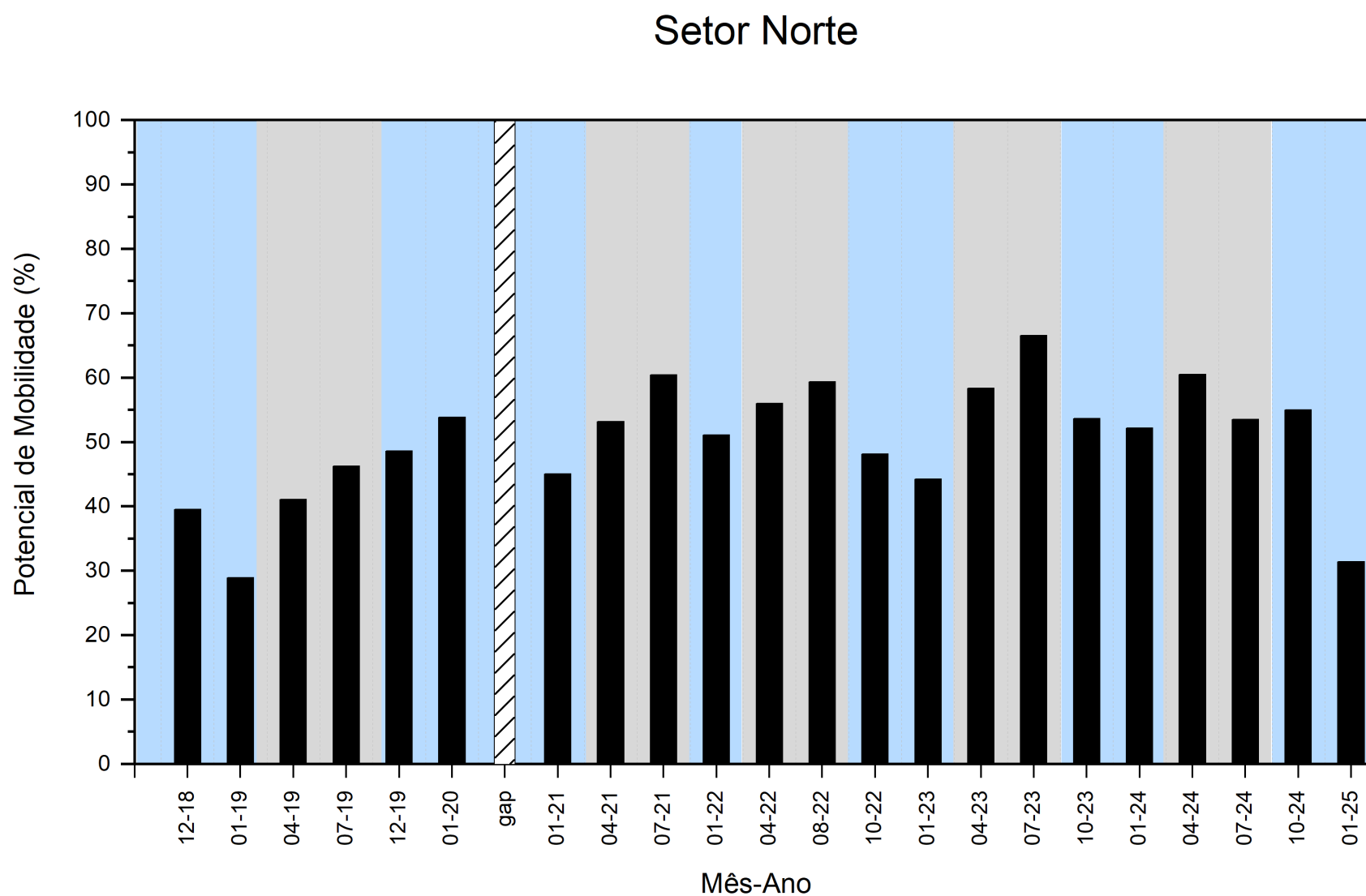
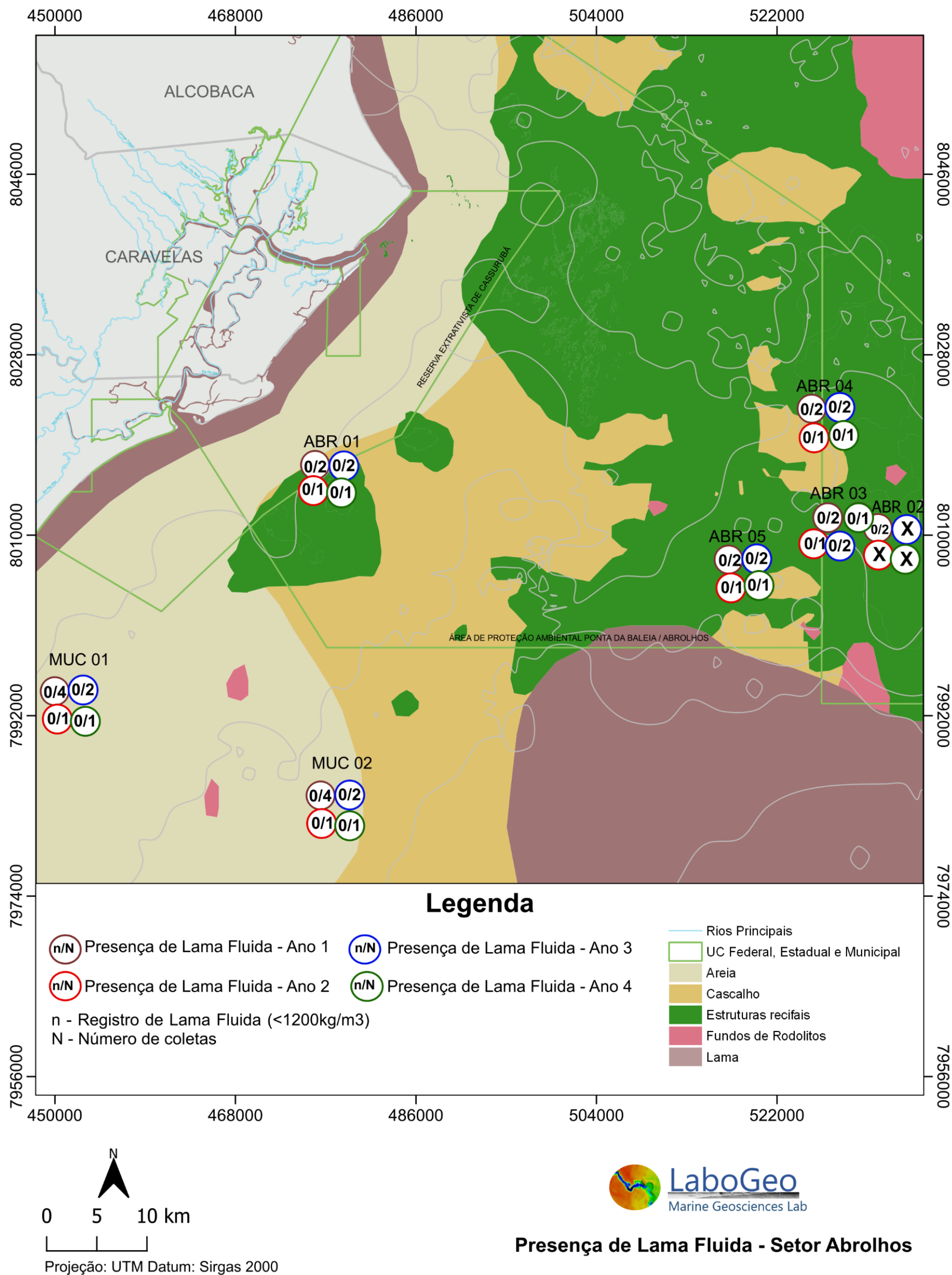


Figura 20: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022). Não ocorreram coletas para esse setor devido uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais esse setor. A informação de tipos de fundo foi produzida através de dados compilados do Labogeo/UFES.



Anita Ruschi - 27/02/2023

Figura 21: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor Norte para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" indicam que a estação não fazia parte da malha amostral no referente ano. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.

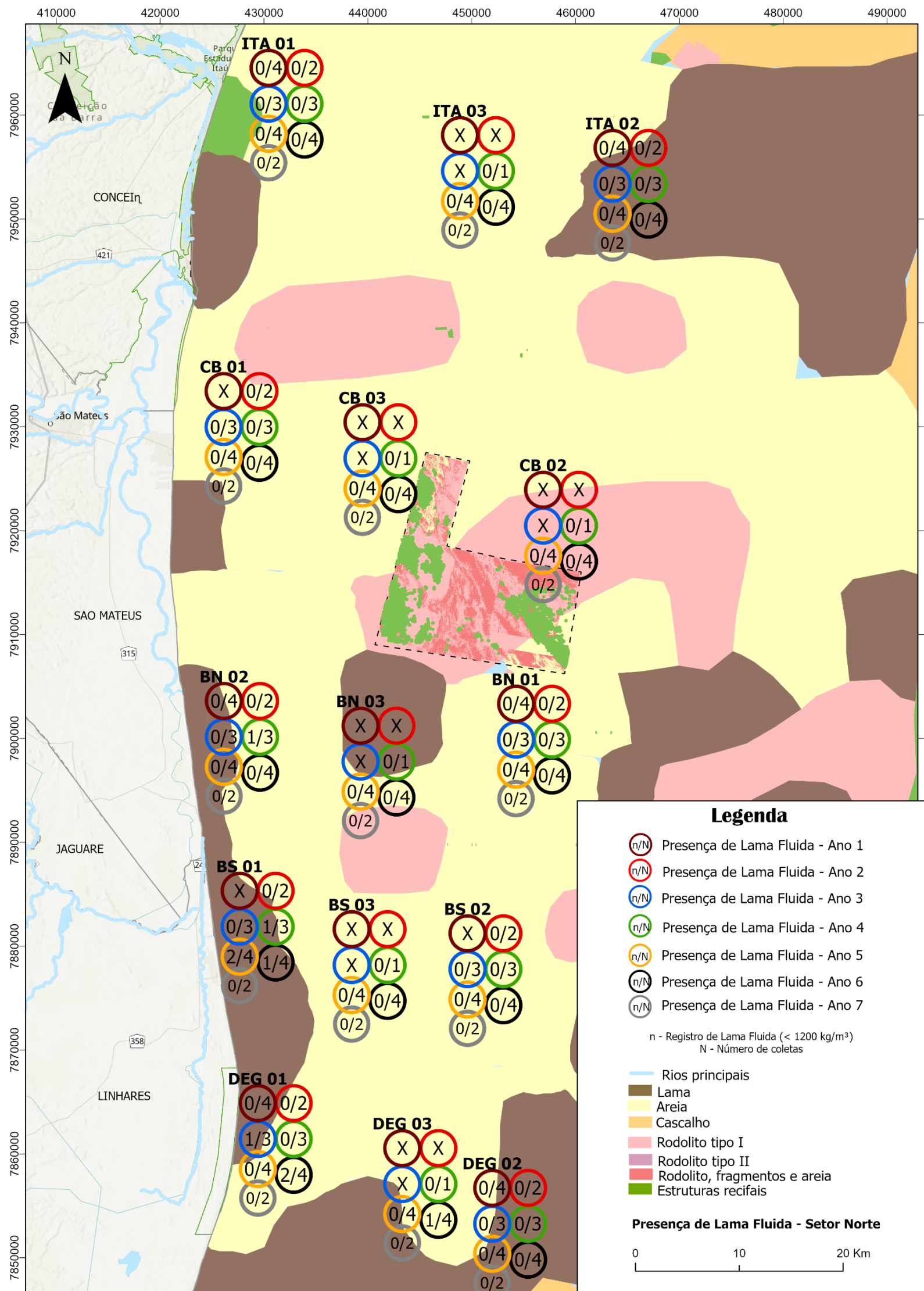


Figura 22: Indicativo da presença de lama fluida para o Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" indicam que a estação não fazia parte da malha amostral no referente ano. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.

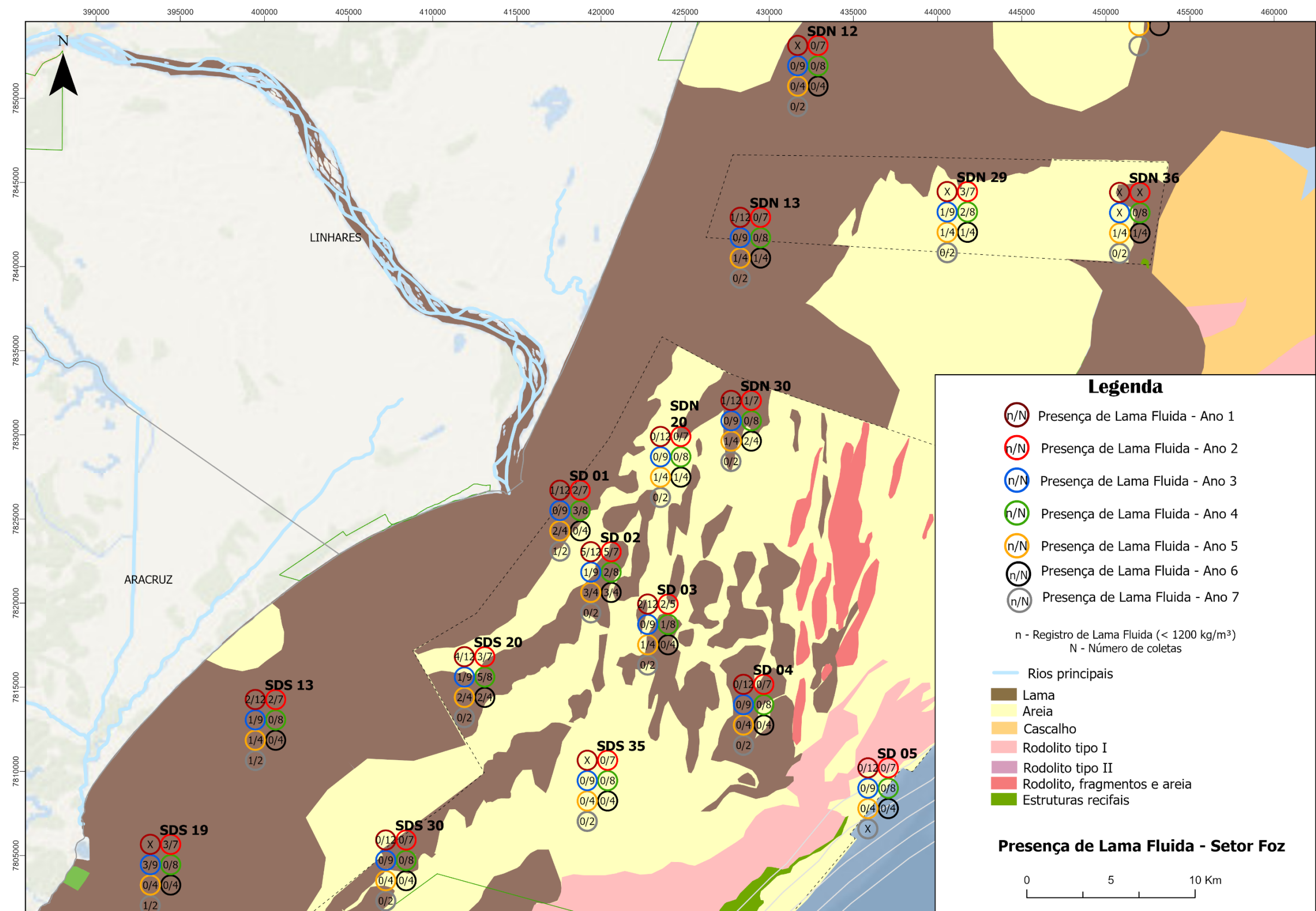
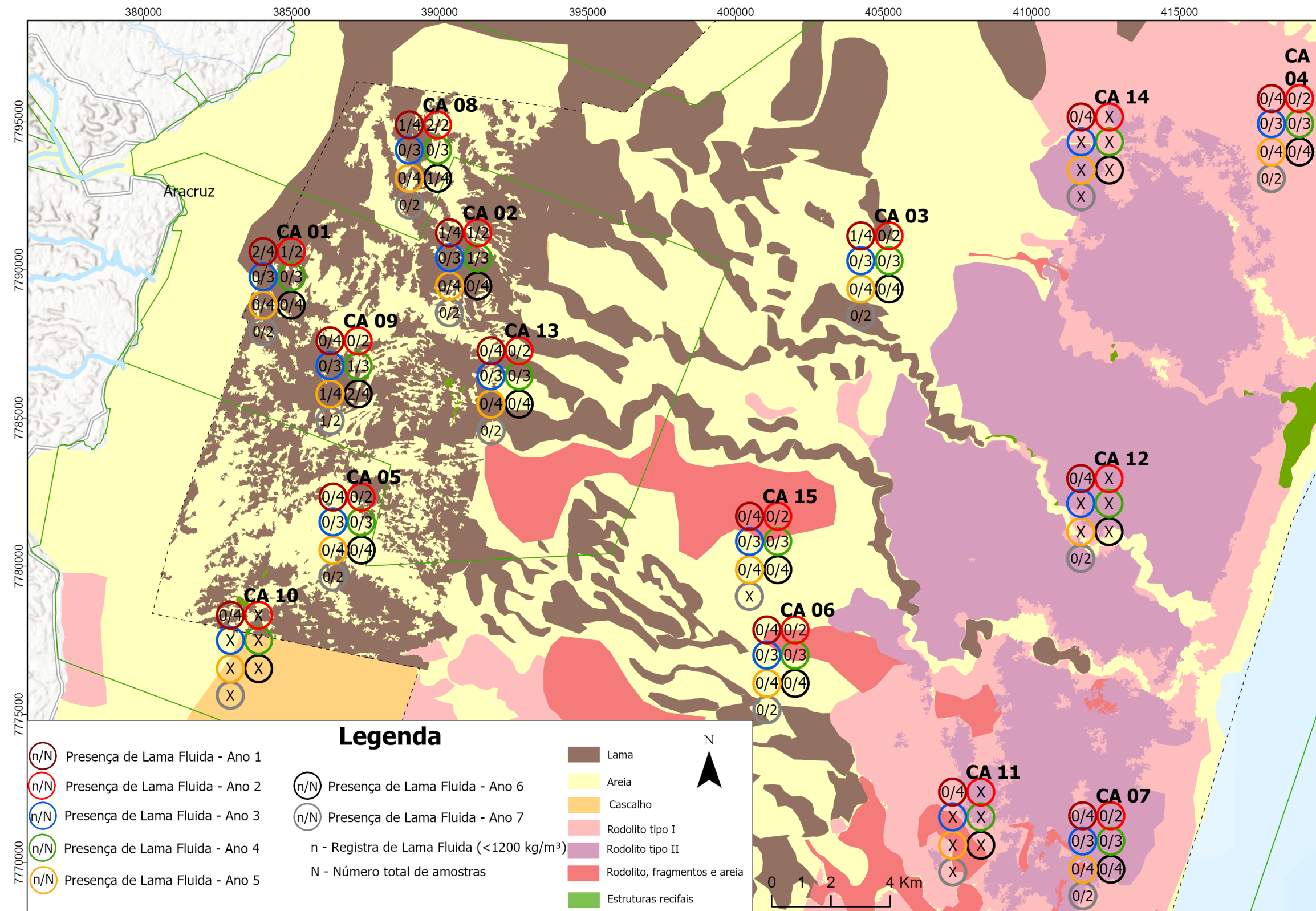


Figura 23: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor APA Costa das Algas para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção das estações do monitoramento. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. Os mosaicos com detalhamento de tipos de fundo foram produzidos pelo tema Sedimentação Marinha (Mapeamento de Habitat) do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.



A densidade do sedimento superficial tem sido utilizada para identificar fundos com lama fluida (Figura 20). Estudos realizados antes do rompimento da Barragem de Fundão já haviam registrado a presença de lama fluida na região da Foz do rio Doce (Quaresma *et al.*, 2015). Após o rompimento da barragem, em novembro de 2015, fundos de lama fluida foram novamente observados na região, desta vez apresentando valores inéditos de densidade úmida ($\leq 1099 \text{ kg/m}^3$; Quaresma *et al.*, 2020). Durante o monitoramento subsequente, fundos com lama fluida foram identificados nos setores Norte, Foz Norte, Foz Central, Foz Sul e APA Costa das Algas, com destaque para os setores Foz Central e Foz Sul, que apresentaram o maior número de ocorrências de lama fluida (Figura 20 a Figura 23). Na escala interanual, observou-se um aumento na ocorrência de fundos com lama fluida no Ano 2 em relação ao Ano 1, seguido de uma redução no Ano 3. No Ano 5, a ocorrência voltou a crescer, superando os valores do Ano 4 e alcançando níveis semelhantes aos registrados nos primeiros anos de monitoramento. Já no Ano 6, os valores observados foram inferiores aos do Ano 5 e essa tendência se manteve durante o período chuvoso do ano 7.

Além de auxiliar na identificação de fundos com lama fluida, a densidade do sedimento superficial é um parâmetro fundamental para o cálculo do potencial de mobilidade do sedimento. O indicador de mobilidade de fundo foi calculado mensalmente durante as campanhas realizadas nos setores Norte, Foz Norte, Foz Central e Foz Sul, considerando a disponibilidade de dados hidrodinâmicos e a densidade, esta última medida exclusivamente para fundos lamosos.

Os resultados do monitoramento indicaram um aumento no potencial de mobilização do sedimento em todos os setores analisados, atribuído à redução da densidade superficial do sedimento de fundo. A análise demonstrou uma tendência significativa de aumento na mobilidade do sedimento ($p\text{-valor} < 0,05$) nos setores da Foz do rio Doce (Figura 18) e no Setor Norte (Figura 19), especialmente quando correlacionada com a diminuição nos valores de densidade do sedimento superficial e o aumento da tensão de cisalhamento de fundo. No ano 7, no mês de janeiro de 2025 observou-se uma diminuição no potencial de mobilidade em todos os setores, seguindo o padrão da série histórica.

Adicionalmente, foi identificada uma variação sazonal no indicador de mobilidade, com maior mobilidade durante o período seco. Apesar dessa diferença sazonal ser evidente, apenas as estações localizadas na Foz Norte apresentaram uma diferença estatisticamente significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) entre os períodos seco e chuvoso.

Nos setores da foz do rio Doce, os maiores potenciais de mobilidade foram observados no período seco do Ano 4. No período chuvoso do Ano 7 apresentou um padrão similar ao do ano 6, ambos superiores aos anos anteriores (4 e 5). É importante destacar que os dados da campanha de julho de 2024 (Ano 6), referentes à foz do rio Doce, não foram incluídos na análise devido a inconsistências nos resultados. Durante a etapa de análise, identificamos que essas inconsistências estavam relacionadas a um erro de amostragem. As causas do erro foram devidamente identificadas e corrigidas, com ajustes necessários nos protocolos de coleta.

Especialmente, a Foz Norte foi a que apresentou os menores potenciais de mobilidade, enquanto os maiores potenciais de mobilidade ocorreram na Foz Sul, resultado da menor densidade do sedimento superficial observada no setor e consequentemente menor tensão crítica de ressuspensão. Isso também tem uma forte relação com a presença do depocentro lamoso ao sul da foz do rio Doce (Quaresma *et al.*, 2015).

No Setor Norte, foi identificado um aumento no percentual de mobilidade do sedimento de fundo durante o período seco do Ano 5, registrando os maiores valores durante o monitoramento nesse setor. Em contrapartida, no período chuvoso, no geral esse setor apresenta menores valores de potencial de mobilidade. No Ano 6, os valores do potencial de mobilidade registrados durante o período chuvoso foram superiores aos dos anos 3 e 5. Contudo, no período seco, esses valores não ultrapassaram os observados no Ano 5. Já no período chuvoso do Ano 7 observamos o segundo menor valor já observado para esse setor (01/25), ficando acima apenas do período chuvoso do Ano 1 (Figura 18 e Figura 19).

3.3 VALORES DE IMS (*IRON MINERALOGICAL SET*) E PRESENÇA DO SINAL DE REJEITO NO SEDIMENTO DE FUNDO

Figura 24: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Abrolhos. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência (1.7×10^{-6}) da susceptibilidade magnética. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022). Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor. A partir de janeiro de 2022 não houve mais coletas para esse setor devido uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais esse setor.

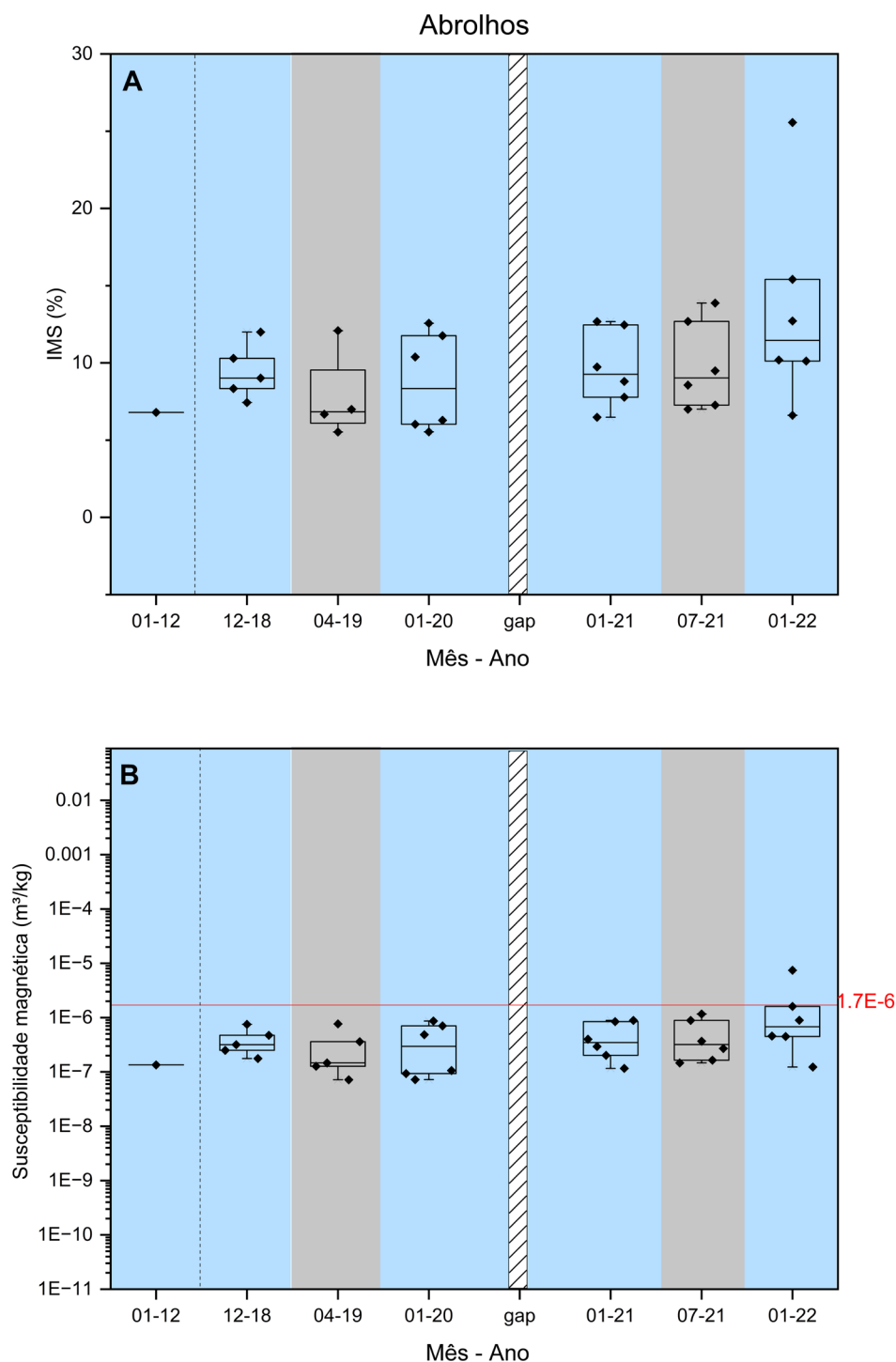
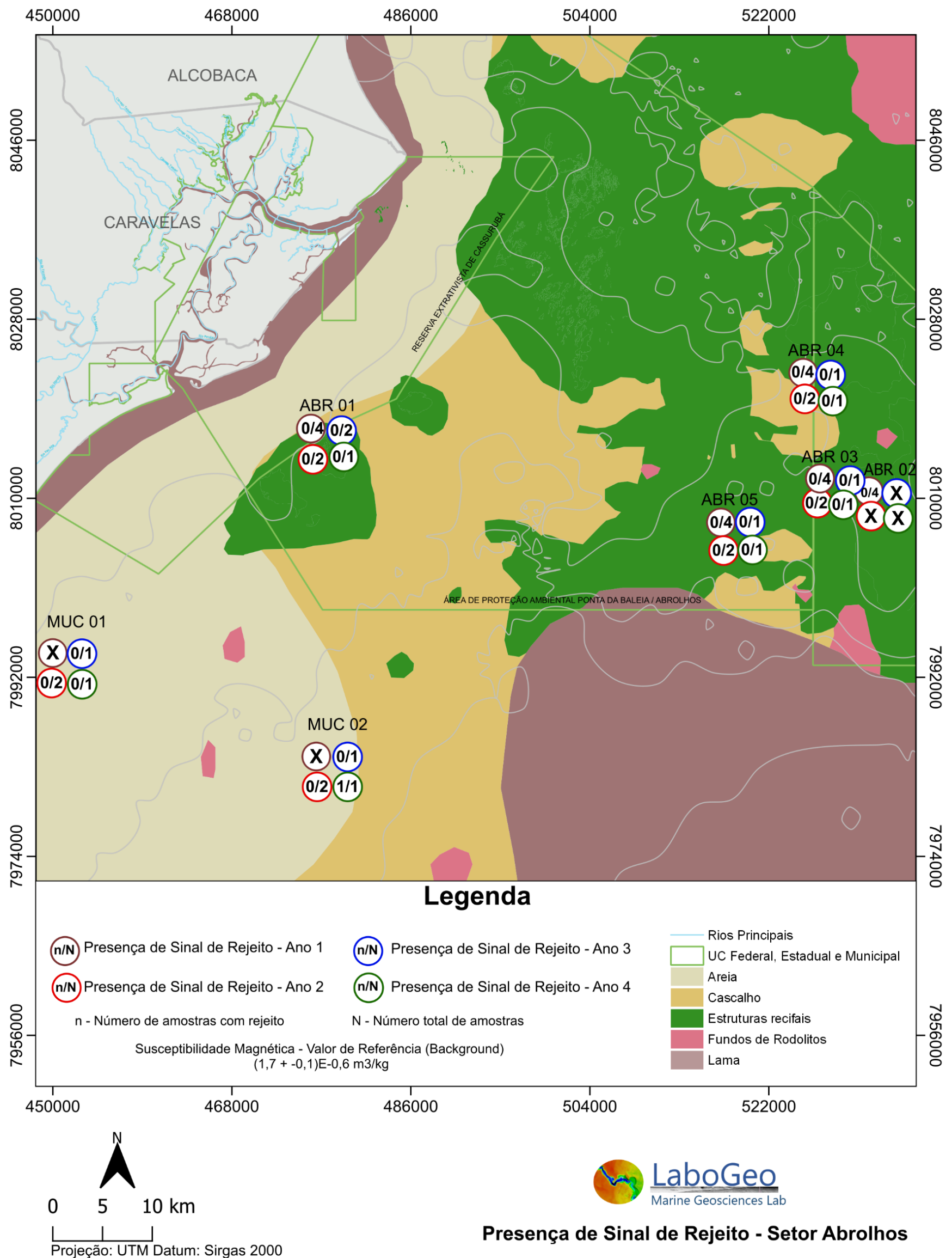


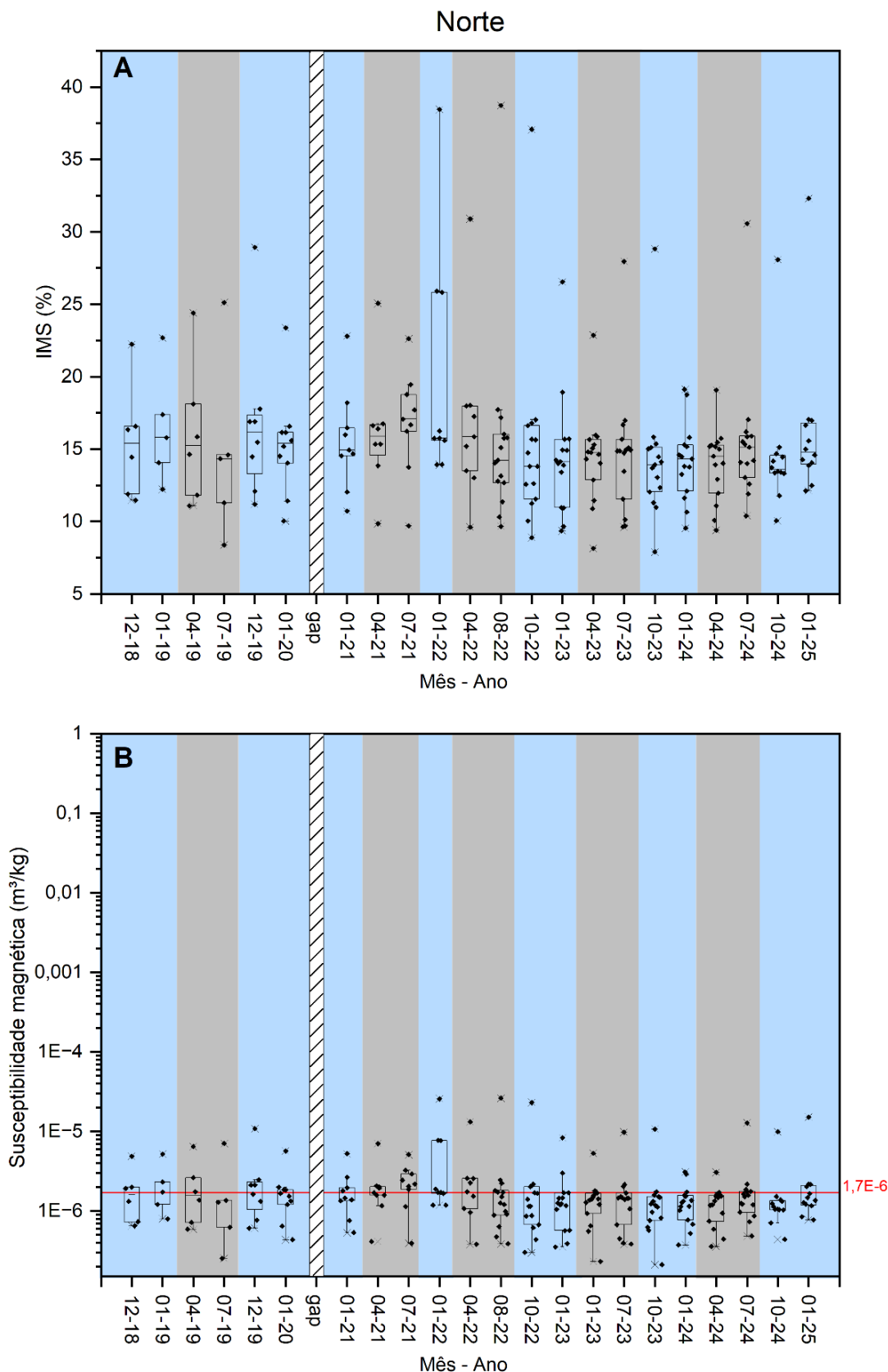
Figura 25: Indicativo da presença do sinal do rejeito para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022). Não ocorreram coletas no período seco para esse setor devido uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais esse setor. A informação de tipos de fundo foi produzida através de dados compilados do Labogeo/UFES.



Anita Ruschi e Michele Sardinha - 24/02/2023

A tendência geral no Setor Abrolhos é a manutenção dos valores de IMS e da susceptibilidade magnética menores ou próximos ao valor de referência nos pontos de monitoramento (Figura 24 e Figura 25), com maiores valores nos pontos mais ao sul e mais próximo à costa (ABR 01). Entretanto, a presença do sinal de rejeito para esse setor é inconclusiva, uma vez que foi observado aumento da susceptibilidade magnética acima do valor de referência (indicativo da presença do rejeito) apenas no período chuvoso do Ano 4, onde a presença do sinal do rejeito foi registrada em uma estação amostral (MUC 02) (Figura 25).

Figura 26: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do sinal do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ($1,7 \times 10^{-6}$) da susceptibilidade magnética. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.



No Setor Norte, as concentrações de índice de material sedimentar (IMS) e de susceptibilidade magnética apresentaram valores ligeiramente acima dos de referência (Figura 26). Na comparação entre os períodos seco e chuvoso, não foram identificadas variações significativas, embora tenha sido observado um aumento nos valores de IMS (%) e de susceptibilidade magnética durante o período chuvoso do Ano 4, em relação aos anos anteriores.

No Ano 6, os valores de IMS foram superiores aos registrados no mesmo período do Ano 5. Quanto ao sinal do rejeito (Figura 27), sua presença foi constatada em todas as campanhas realizadas, mas com maior frequência nas estações localizadas mais ao sul e próximas à costa, como DEG 01, DEG 02 e BS 01.

No período chuvoso do Ano 7, os valores de IMS foram superiores aos registrados no mesmo período do ano 6. Quanto ao sinal do rejeito (Figura 27), sua presença foi constatada nas campanhas realizadas no período chuvoso, mas com maior frequência nas estações localizadas mais ao sul e próximas à costa, como DEG 01, DEG 02 e CB 01.

Figura 27: Indicativo da presença de sinal do rejeito para o Setor Norte para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção das estações após o Ano 1 de monitoramento. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.

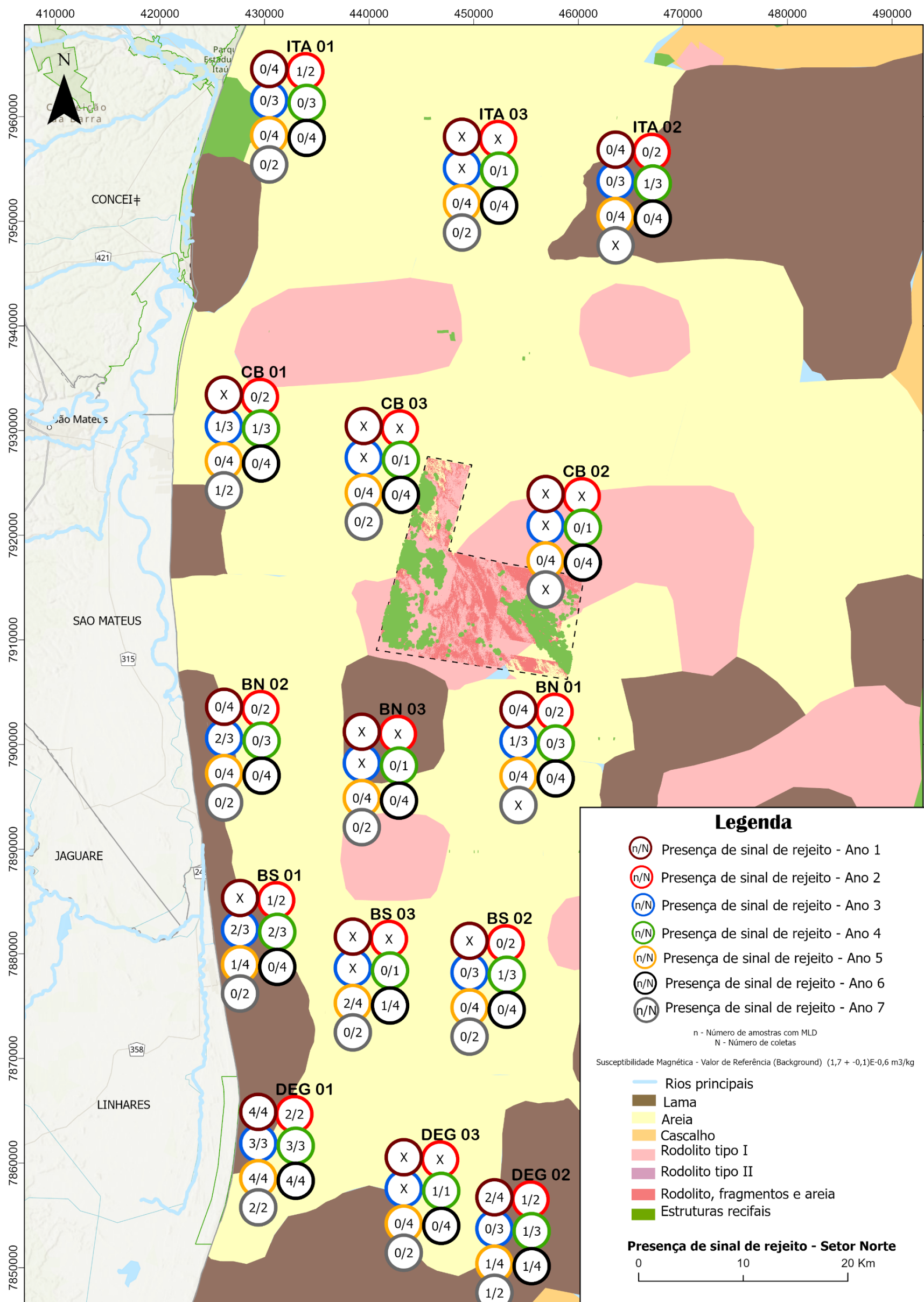


Figura 28: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência (1.7×10^{-6}) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

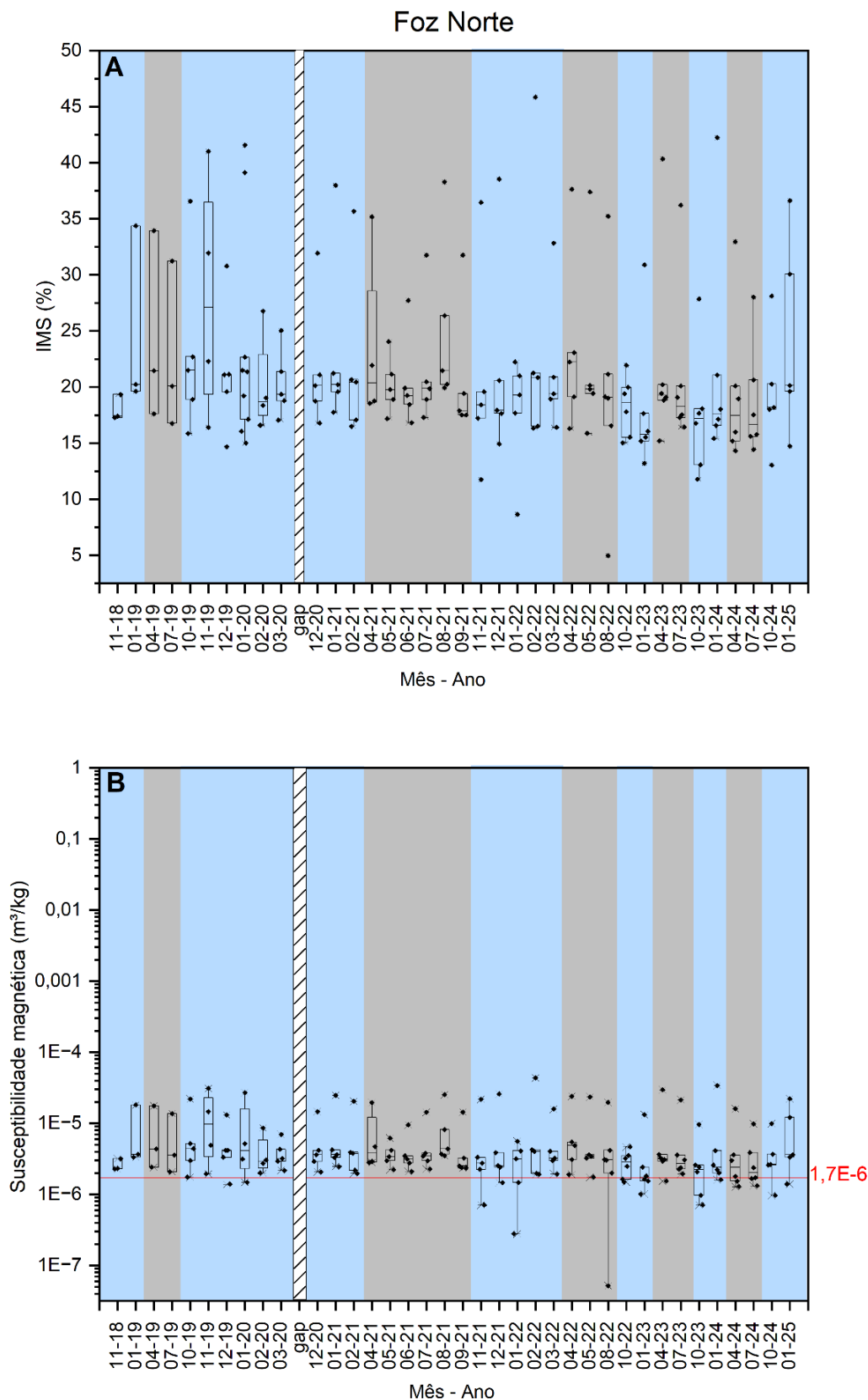


Figura 29: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência (1.7×10^{-6}) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

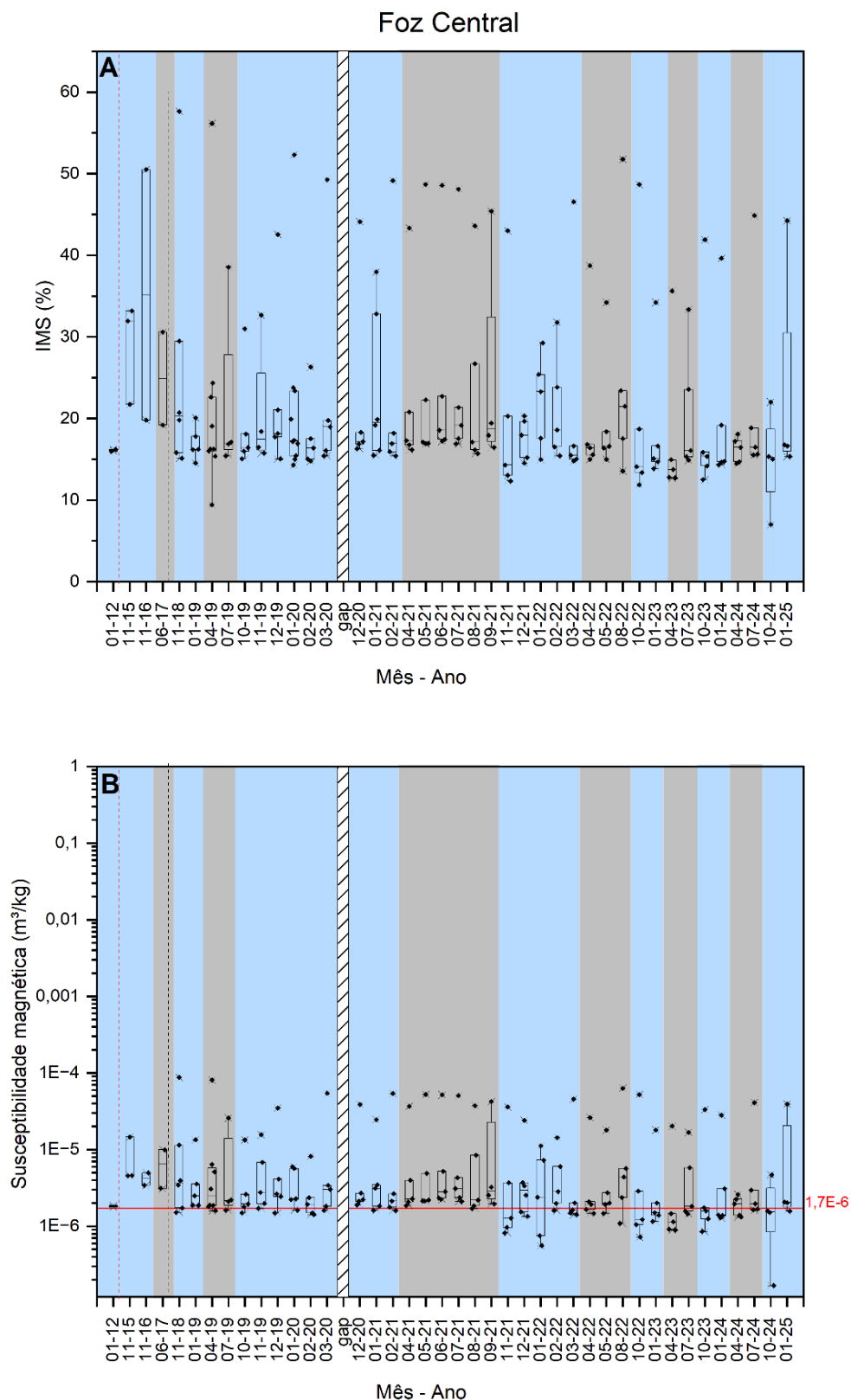


Figura 30: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência (1.7×10^{-6}) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

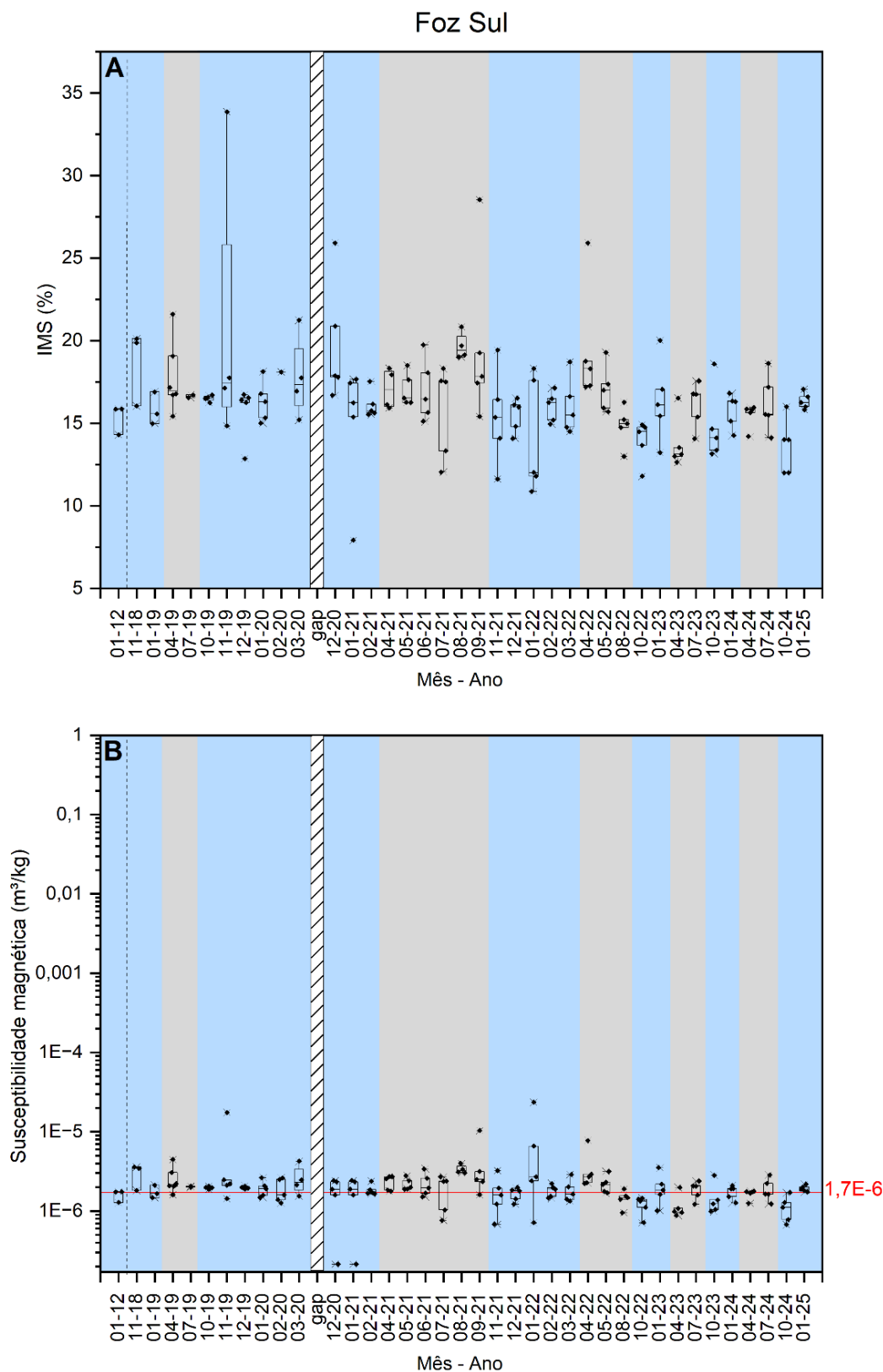
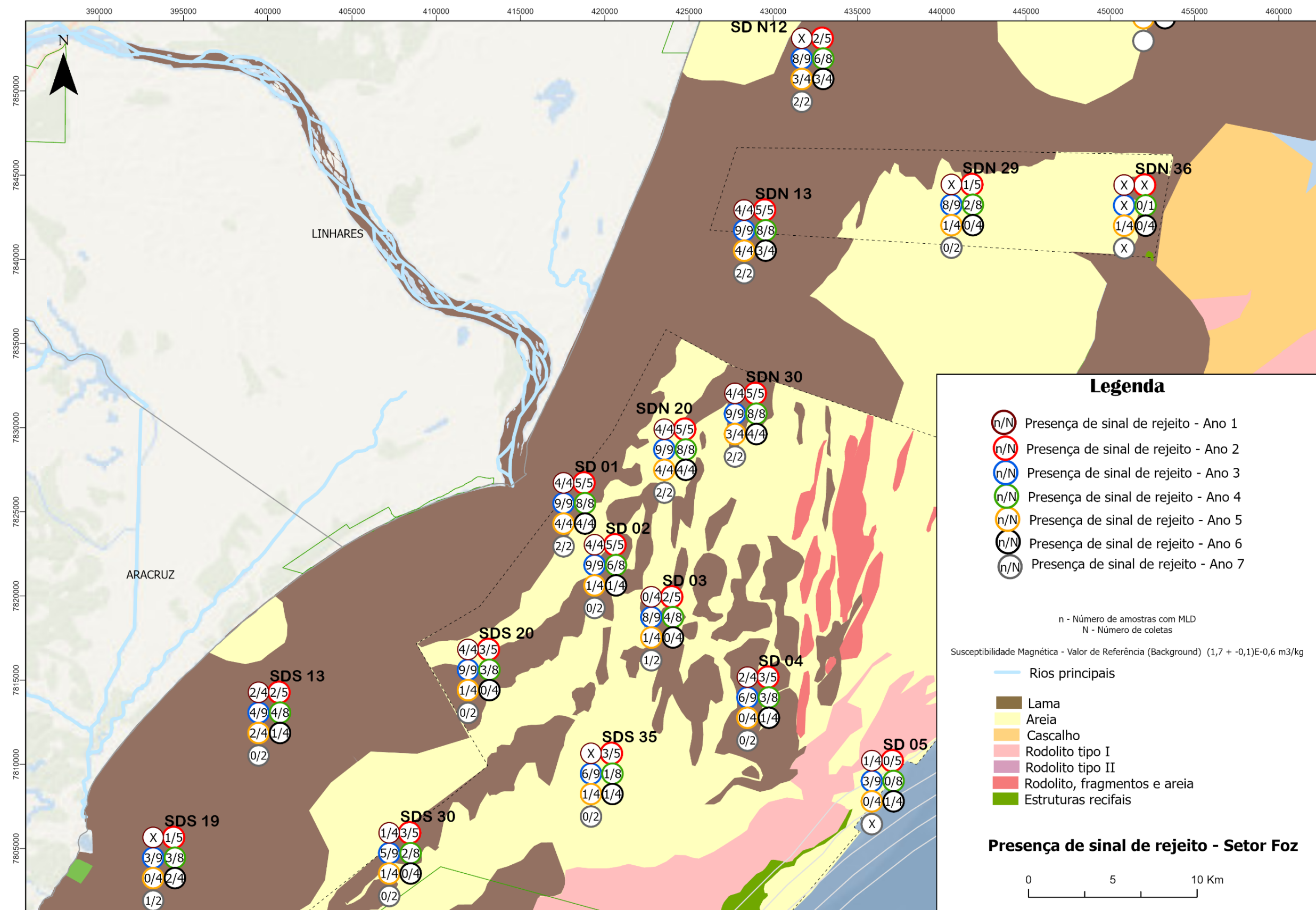


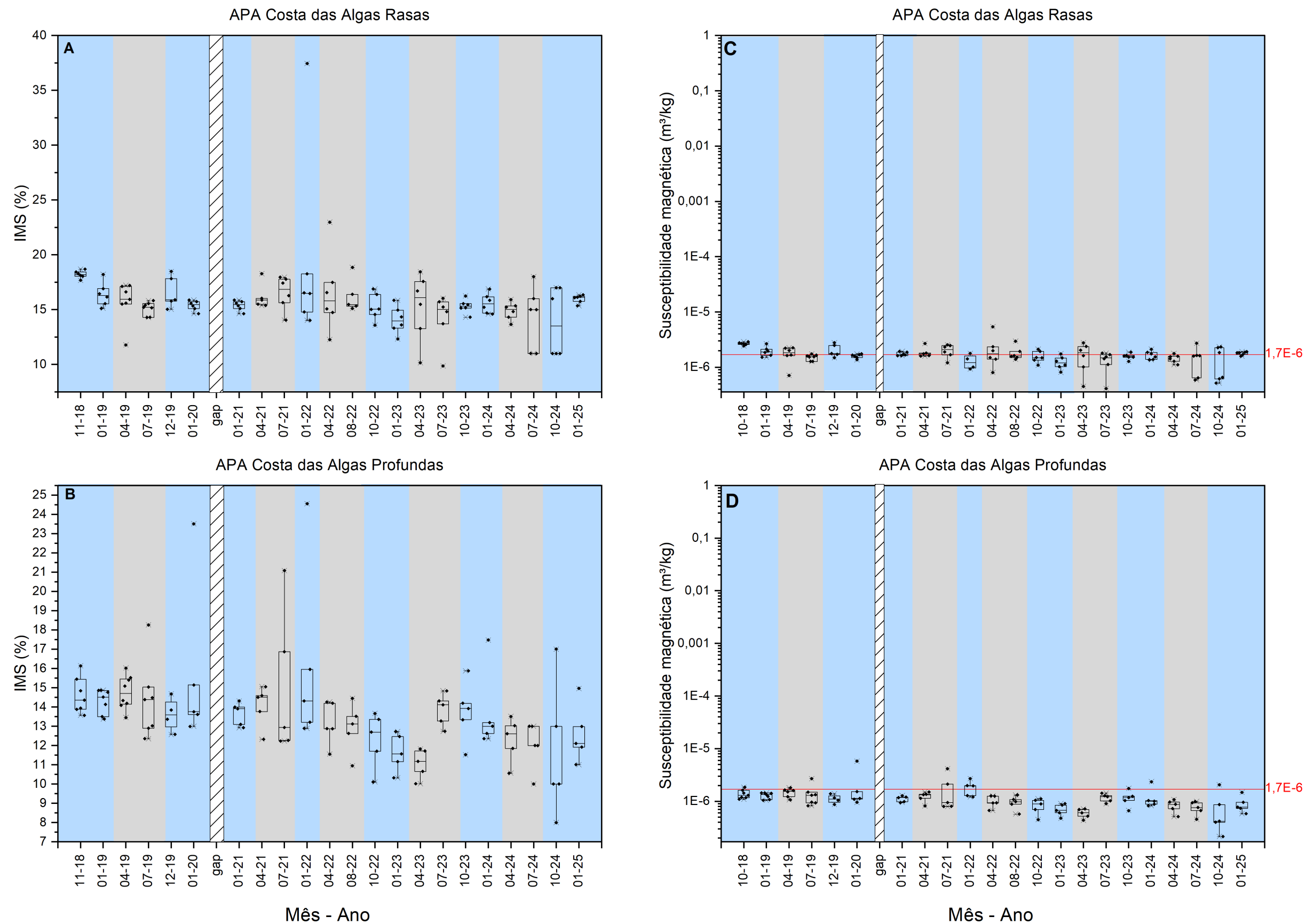
Figura 31: Indicativo da presença de sinal do rejeito para os Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção das estações após o Ano 1 de monitoramento. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.



O comportamento espaço-temporal do sinal de presença do rejeito no Setor Foz do rio Doce segue o padrão de transporte sedimentar na região marinha adjacente à foz do rio Doce, com maiores volumes sendo observados nas áreas mais rasas dos setores. O material apresenta uma direção preferencial de transporte para norte/nordeste, ocorrendo predominantemente em profundidades inferiores a 20 m a partir da Foz do rio Doce, conforme descrito por Quaresma *et al.* (2015). Esse padrão de transporte explica os valores mais elevados de sinal de rejeito no setor Foz Norte, quando comparados ao setor Foz Sul. Entre os setores da Foz do rio Doce (Figura 28 a Figura 30), os maiores valores de IMS (%) e de susceptibilidade magnética foram registrados no setor Foz Central (Figura 29). Apesar de o IMS (%) e a susceptibilidade magnética na Foz do rio Doce apresentarem uma redução em relação aos primeiros anos de monitoramento, os valores ainda permanecem acima dos de referência.

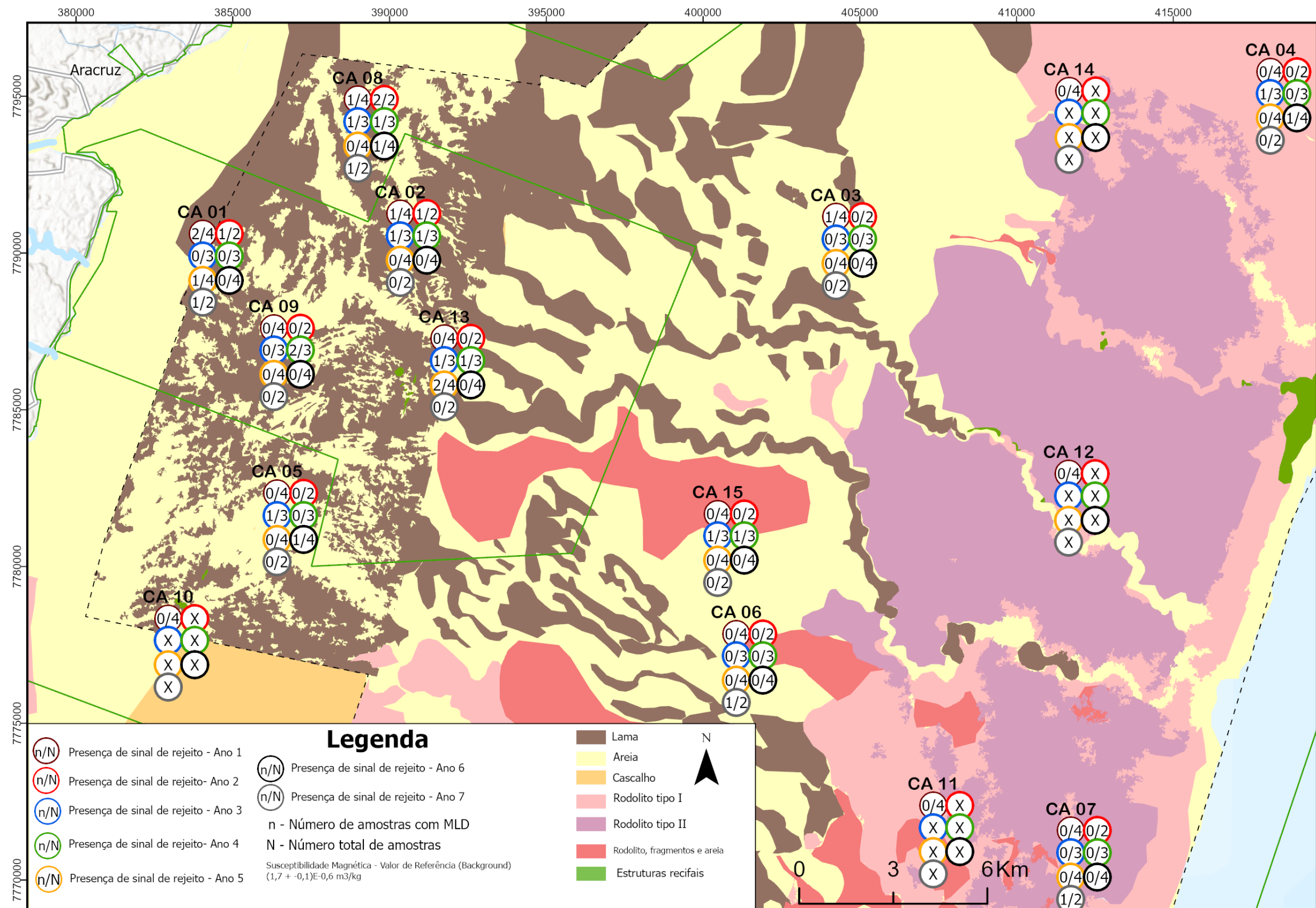
Os pontos mais rasos próximos à foz, como SD01, continuam apresentando altos valores de sinal de rejeito, sugerindo que o aporte de material associado ao MLD na região da foz tem se mantido constante. Esse padrão também é evidente nas estações do setor Foz Norte (Figura 28). A presença do sinal de rejeito (Figura 31) foi observada em todas as estações da Foz do rio Doce, sendo mais frequente nos pontos localizados em profundidades de até 20 m. O maior número de ocorrências da presença de sinal do rejeito na Foz, assim como no setor Norte, ocorreu no Ano 3. A partir do Ano 4, observa-se uma diminuição do número de ocorrências, porém, os pontos que ficam mais próximos a foz não apresentaram redução ao longo do período do monitoramento, indicando que o rejeito continua sendo aportado na região. Especialmente na região da Foz do rio Doce a maior ocorrência da presença de sinal do rejeito ocorre no setor Foz Norte seguido pela Foz Central.

Figura 32: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de sinal do rejeito no sedimento) para o Setor APA Costa das Algas (A) Rasas e (B) Profundas; Valores de susceptibilidade magnética para o Setor APA Costa das Algas (C) Rasas e (D) Profundas. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência (1.7×10^{-6}) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.



Os valores de IMS e susceptibilidade magnética para o Setor APA Costa das Algas (Figura 32) ficaram, em sua grande maioria, próximos ao valor de referência. Além disso, esses valores permaneceram no mesmo patamar ao longo do período de monitoramento. Os maiores valores de IMS (%) e susceptibilidade magnética observados foram para o período chuvoso e seco do Ano 4. Em relação a presença de sinal do rejeito (Figura 33), especialmente a maior ocorrência nesse setor ao longo dos 7 anos de monitoramento foi para as estações APA rasa até 36m (CA 01, CA 02, CA05, CA08, CA09 e CA13). Assim como os outros setores, o maior número de ocorrências da presença de sinal do rejeito foi no Ano 3, seguido por uma redução nos anos posteriores

Figura 33: Indicativo da presença de sinal do rejeito para o Setor APA Costa da Algas para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. Os mosaicos com detalhamento de tipos de fundo foram produzidos pelo tema Sedimentação do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO A CERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO

Considerando os processos sedimentares, observou-se uma diminuição nas concentrações de MPS após o grande aporte de material proveniente do rompimento da Barragem de Fundão nos primeiros meses (novembro de 2015 a janeiro de 2016). No entanto, os valores permaneceram superiores aos de referência (dados de 2013 e 2014 nos setores da Foz), especialmente durante eventos hidrológicos extremos no rio Doce. Segundo as observações realizadas, esses eventos hidrológicos representam o principal fator controlador dos picos de MPS no Setor Foz Central. Nos demais setores estudados, as variações de MPS estão associadas, não apenas à contribuição fluvial do Rio Doce, mas também a um conjunto de fenômenos de alta energia na plataforma continental (como sistemas de frentes frias), que promovem a ressuspensão do sedimento de fundo.

O setor Norte dos Recifes Esquecidos constitui um habitat de grande complexidade, caracterizado por estruturas recifais, vales incisos e formas de fundo diversas. Esta região representa a única evidência de recifes ao sul da plataforma de Abrolhos, formando pináculos e outras estruturas com mais de 5 metros de altura. Além das complexas características de um habitat recifal, a área se destaca pela presença de rodolitos, o que aumenta ainda mais sua importância ecológica. No que se refere aos indicadores analisados, observou-se um aumento significativo da concentração de MPS nas regiões de Barra Nova e Itaúnas, assim como um aumento na mobilidade do sedimento superficial de fundo. Também foi registrada uma maior frequência do sinal de rejeito nas estações mais rasas (DEG 01, DEG 02 e BS 01). Em decorrência disso, o impacto sobre a comunidade bentônica só foi observado no quarto ano de monitoramento, tanto no habitat arenoso e de rodolitos (Norte), quanto no de cascalho em Abrolhos (FEST, 2025). Contudo, os resultados não apresentaram consistência espaço-temporal durante os 7 anos de monitoramento ao longo desse setor.

A foz do rio Doce foi a área mais impactada pelo aporte do MLD, conforme evidenciado pelos indicadores analisados neste estudo e é caracterizada por uma diversidade de fundos, incluindo sedimentos lamosos e arenosos, com estruturas de rodolitos nas porções mais distantes da costa (FEST, 2025). Conforme descrito no anterior FEST (2025) observou-se uma série de barras arenosas lineares em direção offshore a partir da profundidade de 25 m sugerindo uma transição de fundos lamosos para os arenosos à medida que se afasta da costa. Esse padrão sugere que os materiais depositados nos fundos lamosos podem ser transportados para áreas mais profundas ou deslocados lateralmente. Essa dinâmica é corroborada pela detecção do MLD em amostras coletadas na região.

A avaliação da densidade do sedimento superficial e do indicador de potencial de mobilidade do fundo demonstra que o material trazido para a Plataforma Continental pelo rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão alterou as propriedades físicas do sedimento local. Essa mudança é visível na maior frequência de densidades de fundo mais baixas em comparação aos anos anteriores ao rompimento da barragem. Esse fenômeno, combinado com o aumento da energia das ondas na região (ou com a variabilidade intra e interanual), resulta em um maior potencial de ressuspensão do fundo, o que leva à maior mobilização do sedimento. Essa alteração persiste até hoje, provavelmente devido à

continuidade do aporte de MLD à Plataforma Continental por meio do transporte fluvial. Isso é corroborado na plataforma interna do setor Foz Central, onde é possível observar de forma consistente o sinal de rejeito nos sedimentos de fundo e uma tendência de aumento significativo (p -valor $< 0,05$) da razão calculada (IMS%).

Uma análise integrada dos dados de presença de rejeitos, potencial de mobilidade do sedimento de fundo e impacto na comunidade bentônica revelou que o habitat lamoso em frente à foz do rio Doce e na região ao norte, até aproximadamente 30 m de profundidade, apresenta baixa integridade, indicando um impacto significativo (FEST, 2025). Já na porção mais externa, em áreas com profundidade superior a 30 m, onde o habitat é predominantemente arenoso, os sinais de presença de rejeitos foram observados de forma menos constante ao longo dos anos de monitoramento. Essas observações se mantêm.

No setor REVIS/APA Costa das Algas, nas estações rasas até 36 m de profundidade, foi observada a presença contínua do sinal de rejeito nos sedimentos de fundo ao longo de todo o período de monitoramento, com um aumento significativo (p -valor $< 0,05$) na concentração de MPS, revelando-se como a área de maior impacto neste setor. De acordo com o relatório FEST (2025), essa região apresenta uma grande complexidade morfológica e sedimentar alternando entre areia e lama na porção rasa e áreas com laterita, a porção mais profunda apresenta fundos de rodolitos e algas calcárias, além de estruturas recifais nas áreas offshore distais, como crostas e fundos rígidos, formadas por aglomerados de rodolitos — similares aos descritos na região do rio Doce. De forma semelhante, na região central, em direção à plataforma externa da APA Costa das Algas, há indícios da presença MLD e impactos na comunidade bentônica. No entanto, esses efeitos não são uniformes ao longo do tempo, uma vez que, em três estações de amostragem, o impacto foi detectado apenas uma vez, em anos distintos (Figura 33). É importante ressaltar que o habitat afetado foi o fundo de rodolito, um ambiente ecologicamente crucial e especialmente vulnerável ao aporte de material fino.

Figura 34: Resumo gráfico dos principais resultados encontrados ao longo dos 7 anos do monitoramento. A presença do sinal de rejeito e a mobilidade do fundo são as médias destes resultados ao longo dos 7 anos de monitoramento.



5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Os dados da campanha de julho de 2024 (Ano 6), referentes ao percentual de mobilidade do sedimento do fundo na foz do rio Doce, não foram incluídos na análise devido a inconsistências nos resultados. Durante a etapa de análise, identificamos que essas inconsistências estavam relacionadas a um erro de amostragem. As causas do erro foram devidamente identificadas e corrigidas, com ajustes necessários nos protocolos de coleta.

6 REFERÊNCIAS

AMOS C.L., SUTHERLAND T.F. A rapid technique for the determination of dry sediment mass from saturated marine sands. *Journal of Sedimentary Research*, 64(3):668-670. 1994.

BLOTT, S.J.; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248, 2001.

CLIMATE FORECAST SYSTEM REANALYSIS, chamados de Dados de Reanálises, disponível em: <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>>. Acesso em: 11 de setembro de 2023.

DIAS, J.A. A análise Sedimentar e os Conhecimentos dos Sistemas Marinhos, Universidade do Algarve Faro, Portugal, 84 p., 2004.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/Fest-RT-49, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática.341.pag. 2025

GRAZULIS, S., CHATEIGNER, D., DOWNS, R. T., YOKOCHI, A. F. T., QUIROS, M., LUTTEROTTI, L., MANAKOVA, E., BUTKUS, J., MOECK, P. & Le Bail, A. (2009). *J. Appl. Cryst.* 42, 726-729.

ISO, 1995. Soil quality, extraction of trace elements soluble in aqua regia -ISO 11466.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. London: Griffin, 1975. 202 p.

KOMADA, T.; ANDERSON, M. R.; DORFMEIER C. L. Carbonate removal from coastal sediments for the determination of organic carbon and its isotopic signatures, $\delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{14}\text{C}$: comparison of fumigation and direct acidification by hydrochloric acid. *Limnology and Oceanography Methods*, 6, 254–262, 2008.

MCANALLY W. H. *et al.* Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays, and Lakes. I: Present State of Understanding on Character and Behavior. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133, 9-22, 2007.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259, 1945.

MITCHELL, S. B.; UNCLES, R. J.; STEPHENS, J. A. Suspended Particulate Matter: Sampling and Analysis. In: Uncles, R. J.; Mitchell, S. B. Estuarine and Coastal Hydrography and Sediment Transport. Cambridge: Cambridge University Press. cap. 7, p. 179-210, 2017.

MITCHENER, H.; TORFS, H. Erosion of mud/sand mixtures. Coastal Engineering 29, 25, 1996.

MOOK, D. H.; HOSKIN, C. M. Organic determinations by ignition: caution advised. Estuarine and Coastal, Shelf Science. 15: 697–699, 1982.

OLIVEIRA, K.S.S.; QUARESMA, V.S. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. J. South Am. Earth Sci. 78, 101–115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.06.009>

OLIVEIRA, K.S.S. Influência das condições de vento, de ondas e do aporte fluvial na dinâmica sedimentar do trecho centro-norte da Plataforma Continental do Espírito Santo (PCES). Tese de Doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2018

ORLANDO, M. T. *et al.* Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. Chemosphere, v. 257, p. 127184–127184, out. 2020.

QUARESMA, V.S. *et al.* Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. Brazilian Journal of Geology, 45(4), 635–644, 2015. <https://doi.org/10.1590/2317-488920150030274>

QUARESMA, V.S. *et al.* The effects of a tailing dam failure on the sedimentation of the eastern Brazilian inner shelf. Continental Shelf Research, 205, 104172, 2020.

QUARESMA, V. S.; *et al.* The impact of trace metals in marine sediments after a tailing dam failure: the Fundão dam case (Brazil). Environmental Earth Sciences, v. 80, p. 570-586, 2021.

ROLLINSON, H. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group U. K. (Edit.), England, 350 p., 1993.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. RT-39D - Evolução Espaço Temporal na Qualidade Ambiental e na Biodiversidade no Ambiente Marinho, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 1409 pag. 2021.

SOULSBY, R. Dynamics of Marine Sands A Manual for Practical Applications. Thomas Telford, London, 1997.

WINTERWERP, J. C.; VAN KESTEREN, W. G. M. Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment, 1 Ed. Elsevier, Amsterdam. 466p., 2004.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 259, n. 1-4, p. 254-271, Mar. 2002.