

**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: Fundos Recifais e Bancos de Rodolitos

RT- 44/ NOV 23

RSE2023 PMBA/Fest

Vitória,

Novembro de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	RESULTADOS DOS INDICADORES	3
2.1	COBERTURA BÊNICA DE RECIFES CORALÍNEOS	4
2.2	COBERTURA DE BANCOS DE RODOLITOS	16
2.3	COBERTURA BÊNICA DE RECIFES ADJACENTES AO LITORAL DA APA COSTA DAS ALGAS.....	20
2.4	FISIOLOGIA DE CORAIS	23
2.5	DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS	33
2.6	NATUREZA DO SEDIMENTO E TAXAS DE SEDIMENTAÇÃO EM RECIFES E BANCOS DE RODOLITOS	38
2.7	PRODUÇÃO DE CaCO_3 E COLONIZAÇÃO DE ORGANISMOS SÉSSEIS EM ESTRUTURAS ARTIFICIAIS.....	50
3	REFERÊNCIAS	57

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

O histórico de malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) abrange informações de suma importância para o balizamento do presente programa, uma vez que passou por modificações ao longo do tempo, visando melhor atender aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) **MS – Malha e Frequência amostral**, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) **MS – Mapas das malhas amostrais**, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais coletadas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais coletadas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

2 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 e obtidos ao longo do monitoramento (setembro/2018 – março/2023) 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 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 abaixo.

Neste sentido, quando as interpretações e conclusões não se alteraram, o texto aqui apresentado é idêntico ao apresentado no Relatório Anual (FEST, 2023). Alguns trechos de relatórios anteriores também foram reapresentados no sentido de permitir a compreensão dos resultados, considerando o conhecimento gerado pelo projeto em suas etapas iniciais de execução.

2.1 COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES CORALÍNEOS

Figura 1 : Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais bênticas. Diagramas de ordenação (nMDS) baseados nos dados dos nove sítios recifais abrangidos pelo PMBA/Fest [dados dos primeiros semestres, incluindo dados anteriores ao rompimento e ao PMBA (PRE), oriundos do PELD Abrolhos]. As “pizzas” representam a cobertura percentual dos quatro grupos funcionais de corais e das categorias de recobrimento mais representativas (recobrimento >20%). Nos painéis A e B estão sobrepostas as correlações de Pearson (>0,5) com as coberturas percentuais (sem transformação). Legendas Painel C: A=Grupo funcional AGARICIAS (corais de crescimento rápido), B=MONTASTRAEAS (corais massivos de crescimento lento), C= MUSSISMILIAS (corais massivos, endêmicos), D= MILLEPORAS (hidrocorais ramificados), E= Macroalgas, F= Zoantídeos, G=Cianobactérias, H= Esponjas e ascídias, I= Sedimentos, J=Turf. Legendas Painel D: A-H= como acima, I=CCA, J=Turf. A posição relativa das amostras foi mantida para os painéis de topo (A, C e E) e parede (B, D, F), respectivamente. Nos painéis C e D as categorias menos discriminantes não foram mostradas nas “pizzas”, visando facilitar a visualização dos padrões na estrutura das comunidades de cada estação amostral. Legendas painéis D e F: Azul=pré-rompimento (PRE); vermelho=pós-rompimento (POS).

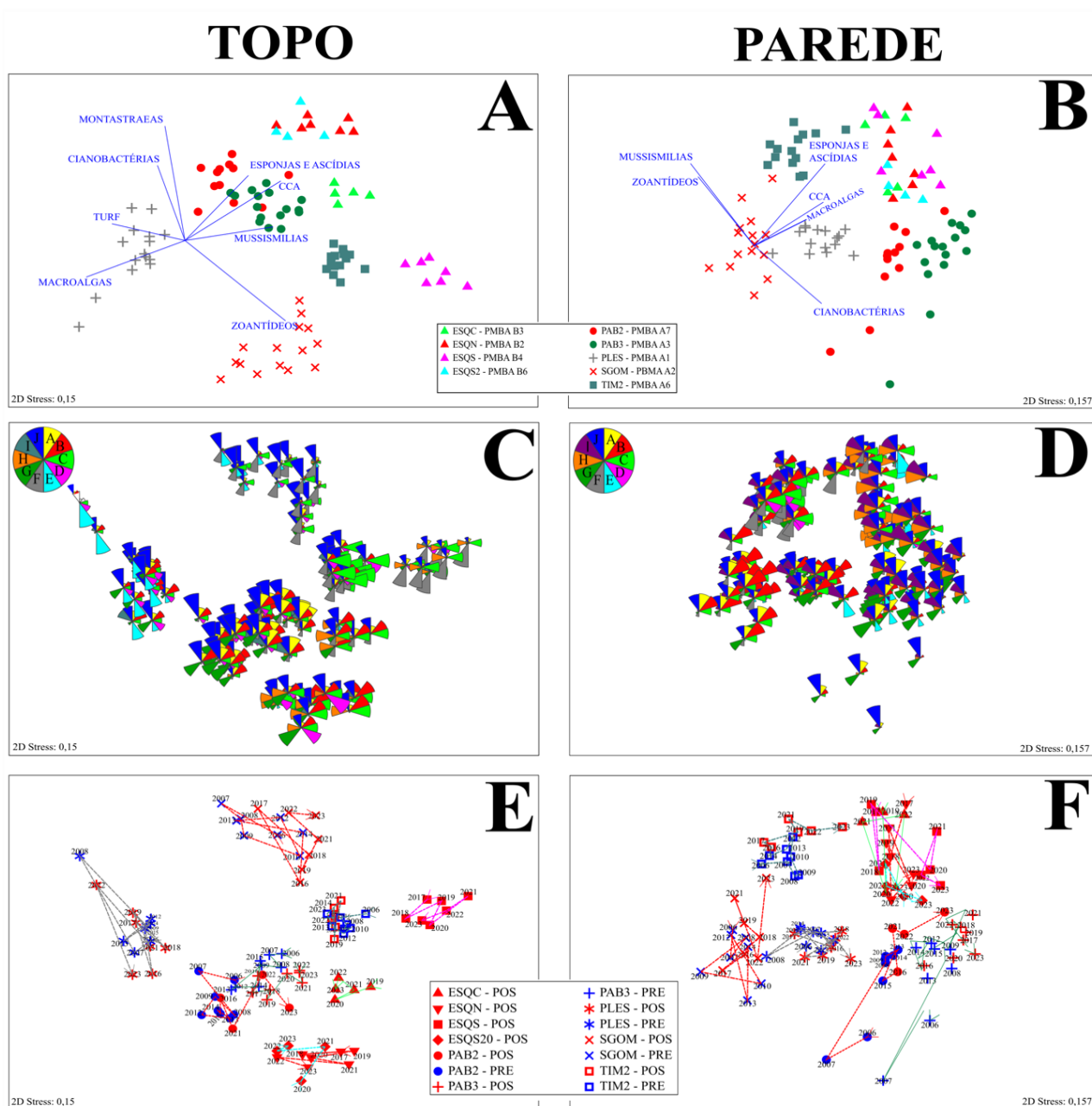


Tabela 1 : Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais bênticas. Sumário das PERMANOVAs baseadas nos dados de cobertura dos nove sítios recifais monitorados no âmbito do PMBA/Fest (primeiro semestre, incluindo dados anteriores ao rompimento e ao PMBA/ Fest, oriundos do PELD Abrolhos). O fator “Barragem” (2), fixo, se refere à codificação das amostras como anteriores ou posteriores (2016 em diante) ao rompimento. ** = nem todos os níveis do segundo fator estão presentes em todos os sítios.

TOPOS	df	SS	MS	Pseudo-F	P(MC)
(1) Sítio	8	5,00E+09	62526	158,73	0,001
(2) Barragem	1	13094	13094	33,553	0,035
(1)x(2) **	4	15870	3967,4	10,072	0,001
Resíduos	970	3,821E+05	393,92		
Total	983	9,596E+05			

PAREDES	df	SS	MS	Pseudo-F	P(MC)
(1) Sítio	8	2,685E+05	33562	88,214	0,001
(2) Barragem	1	13586	13586	4,4922	0,016
(1)x(2) **	4	12299	3074,8	8,0819	0,001
Resíduos	981	3,7323E+05	380,46		
Total	994	7,1111E+05			

No relatório anterior (FEST, 2023) analisamos a variabilidade espaço-temporal no recobrimento bêntico ao nível dos sítios amostrais, em toda a região de estudo, considerando todos os dados disponíveis, antecedentes (a partir de 2006) e posteriores ao PMBA/Fest. Em síntese, observou-se discriminação consistente nas ordenações, confirmadas por PERMANOVAs par-a-par (136 pares de sítios), separadamente para cada habitat. **Concluimos que, apesar de terem apresentado variação temporal relevante, boa parte dos sítios recifais manteve uma estrutura de comunidades bênticas própria, singular** (alguns sítios abrangeram 16 anos de dados e não se sobrepueram às nuvens de pontos dos demais sítios). **Esse padrão, que denominamos de “identidade” de sítio, é relevante por demandar cautela nas estratificações espaciais subsequentes.**

Para a análise do Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais bênticas e, considerando os dados dos nove sítios monitorados no âmbito do PMBA/Fest, incluindo dados antecedentes à implementação do PMBA/Fest (provenientes do PELD Abrolhos e outros projetos), atualizamos as análises sobre a variação espaço-temporal na estrutura das comunidades. A abordagem analítica utilizada foi semelhante àquela do relatório anual anterior (FEST, 2023).

A Figura 1 representa as coberturas dos recifes em um diagrama de ordenação (NMDS) e evidencia que os topos de Timbebas (TIM2-A6), Esquecidos Sul (ESQS-B4) e Sebastião Gomes (SGOM-A1),

costeiros, continuaram apresentando maiores coberturas por zoantídeos, organismos alelopáticos a corais e típicos de locais rasos sob sedimentação intensa (TEIXEIRA et al. 2021). Pedra de Leste (PLES-A1), seguido por Sebastião Gomes (SGOM-A2), ambos costeiros, continuaram se destacando pela contribuição expressiva de macroalgas, organismos que podem ser alelopáticos a corais e indicadores de sobrepesca (TEIXEIRA et al. 2021). Esses sítios também se destacaram pela menor contribuição de corais do grupo funcional MUSSISMILLIAS (grupos funcionais de corais definidos no Relatório Anual anterior - FEST, 2023). Os dois sítios no Parcel dos Abrolhos (PAB2 e 3, A7 e A3) continuaram apresentando contribuição expressiva de corais dos grupos funcionais MILLEPORAS e MONTASTRAEAS, ao passo que o sítio mais central dos Recifes Esquecidos (ESQC-B3) seguiu com contribuição importante de esponjas e ascídias. As comunidades das paredes seguiram mais homogêneas do que as dos topos (Figura 1B e D). Timbebas (TIM2-A6), Esquecidos Sul (ESQS-B4) e Sebastião Gomes (SGOM-A1) continuaram apresentando coberturas importantes de corais do grupo funcional MUSSISMILLIAS (especialmente *M. hartii*), ao passo que Sebastião Gomes (SGOM-A2) permaneceu com contribuição importante de corais do grupo funcional MONTASTRAEAS. Os sítios nos Recifes Esquecidos (ESQC-B3) continuaram apresentando contribuição importante de esponjas e ascídias e se assemelharam aos do Parcel dos Abrolhos (PAB2 e 3, A7 e A3) pela contribuição mais expressiva de turf em relação a macroalgas. A variabilidade temporal seguiu maior nas paredes, habitat é dominado por organismos de crescimento rápido e ciclo de vida curto (e.g., macroalgas, turf).

PERMANOVAs de dois fatores explorando o efeito dos sítios (fator aleatório, 9 níveis) e do rompimento da barragem (fator fixo, 2 níveis: Pré e Pós rompimento), separadamente para cada habitat, também foram refeitas com base na atualização dos dados (Tabela 1). A avaliação das mudanças associadas ao período após o rompimento foi conservadora, uma vez que quatro dos nove sítios recifais monitorados no âmbito do PMBA/Fest só possuem dados obtidos três anos após o rompimento (Área B – Recifes Esquecidos). Os resultados seguiram confirmando a forte identidade dos sítios e o efeito significativo do rompimento. Também foram detectadas interações significativas entre os dois fatores.

Figura 2 : Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais bênticas. Diagramas de ordenação (nMDS) baseados nos dados de cobertura dos cinco sítios recifais com dados pré e pós rompimento (março de 2023, incluindo dados pré-rompimento oriundos do PELD Abrolhos). O Painei A se refere aos dados de topo e o Painei B se refere aos dados das paredes. As cabeças de seta indicam o início e o final de cada série. Amostras pré (PRE) e pós (POS) rompimento estão codificadas em azul e vermelho, respectivamente.

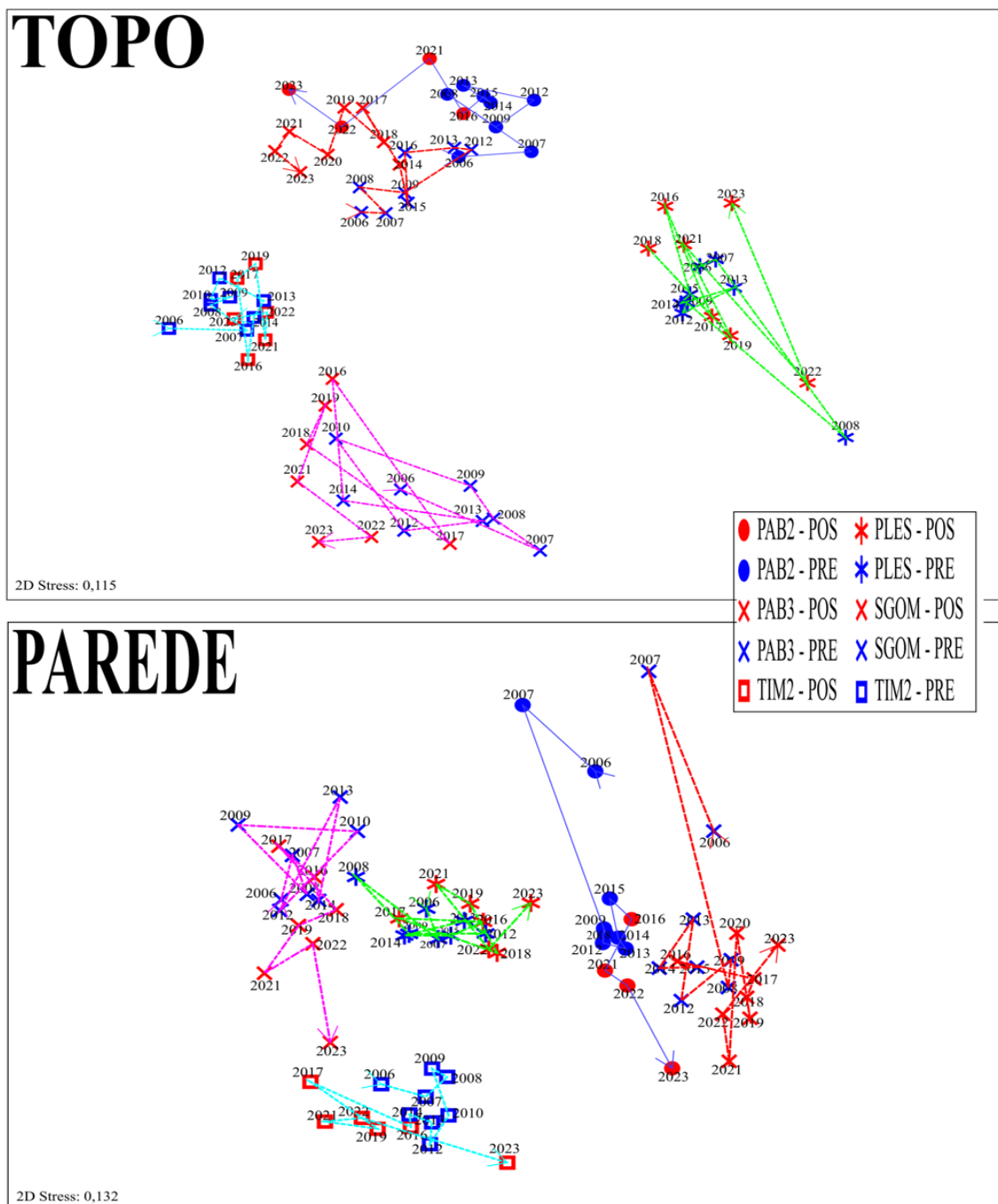


Tabela 2 : Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais bêmicas. Sumário das PERMANOVAs baseadas nas coberturas dos cinco sítios com dados pré e pós rompimento. O fator "Barragem" (2), fixo, se refere à codificação das amostras como anteriores ou posteriores (2016 em diante) ao rompimento.

TOPO	df	SS	MS	Pse.-F	P(MC)
(1) Sítio	4	3,0148E+05	75369	199,71	0,001
(2) Barragem	1	13094	13094	3,3555	0,047
(1)x(2) **	4	15870	3967,4	10,513	0,001
Resíduos	705	2,6606E+05	377,38		

PAREDE	df	SS	MS	Pse.-F	P(MC)
(1) Sítio	4	2,0488E+05	51219	130,85	0,001
(2) Barragem	1	13586	13586	4,4919	0,023
(1)x(2) **	4	12299	3074,8	7,8555	0,001
Resíduos	717	2,8065E+05	391,43		

Ordenações considerando apenas os cinco sítios para os quais existem dados anteriores e posteriores ao rompimento, todos na Área A (Abrolhos e adjacências), também com dados atualizados, confirmaram o efeito do rompimento na estrutura das comunidades recifais (Figura 2). Confirma-se também a menor variabilidade do topo de Timbebas (TIM2-A6), sítio mais afastado da foz do Rio Doce. As PERMANOVAs correspondentes, com o mesmo delineamento fatorial e realizadas separadamente para cada habitat, também evidenciaram o efeito do rompimento da barragem (Tabela 2).

Figura 3: Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais bênticas. Cobertura percentual dos grupos funcionais de corais e outras categorias de recobrimento que compõe o indicador de cobertura bêntica nos topos dos nove recifes abrangidos pelo PMBA/Fest (considerando também dados pré rompimento obtidos pelo PELD Abrolhos). As linhas de cada elemento representam os organismos indicadores, ao passo que as colunas representam os anos. Os anos após o rompimento (apenas para Área A) estão destacados com uma seta vermelha. Para facilitar a visualização da variação, as escalas dos valores das abundâncias diferem nos diferentes elementos dos painéis.

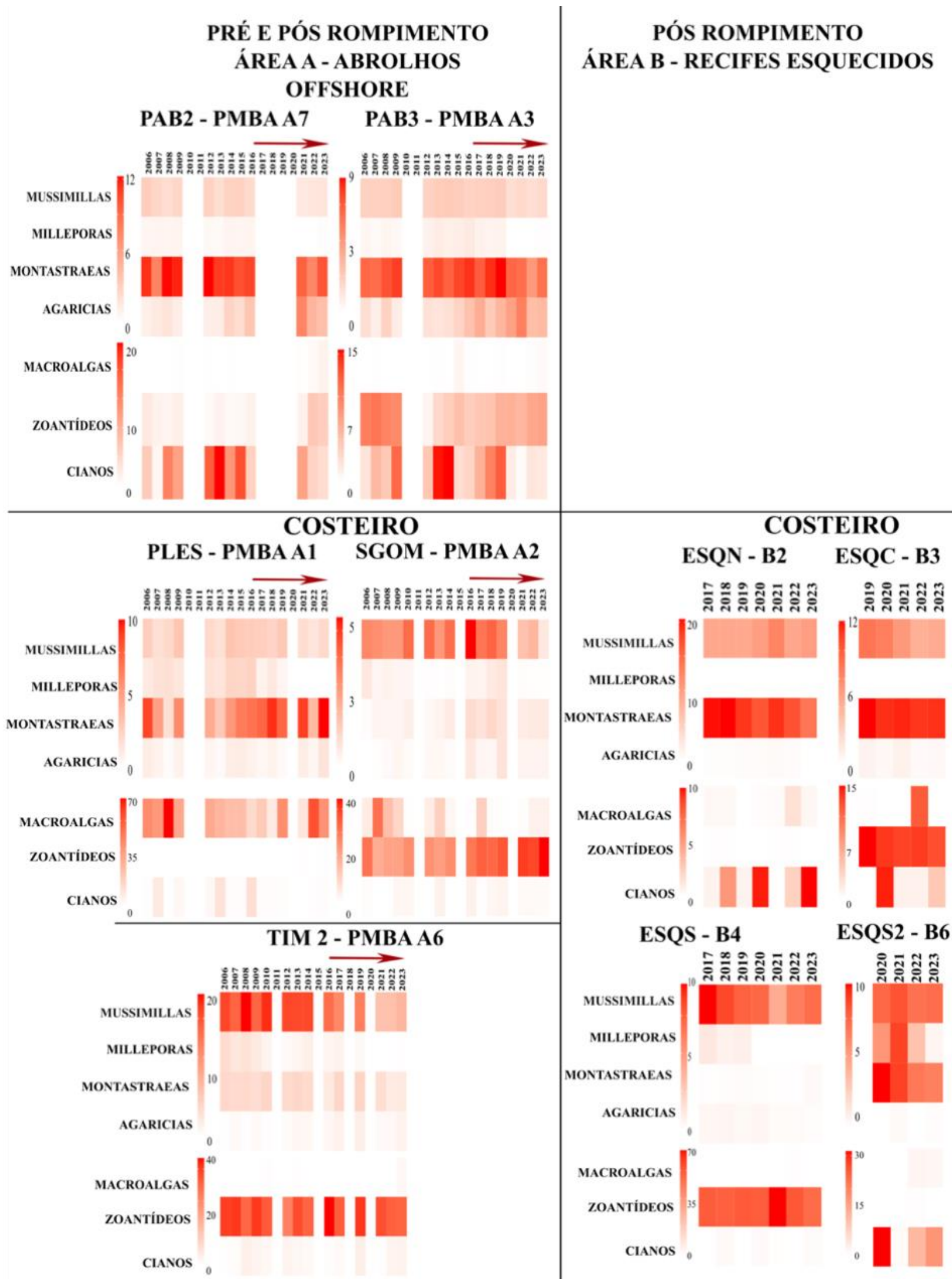
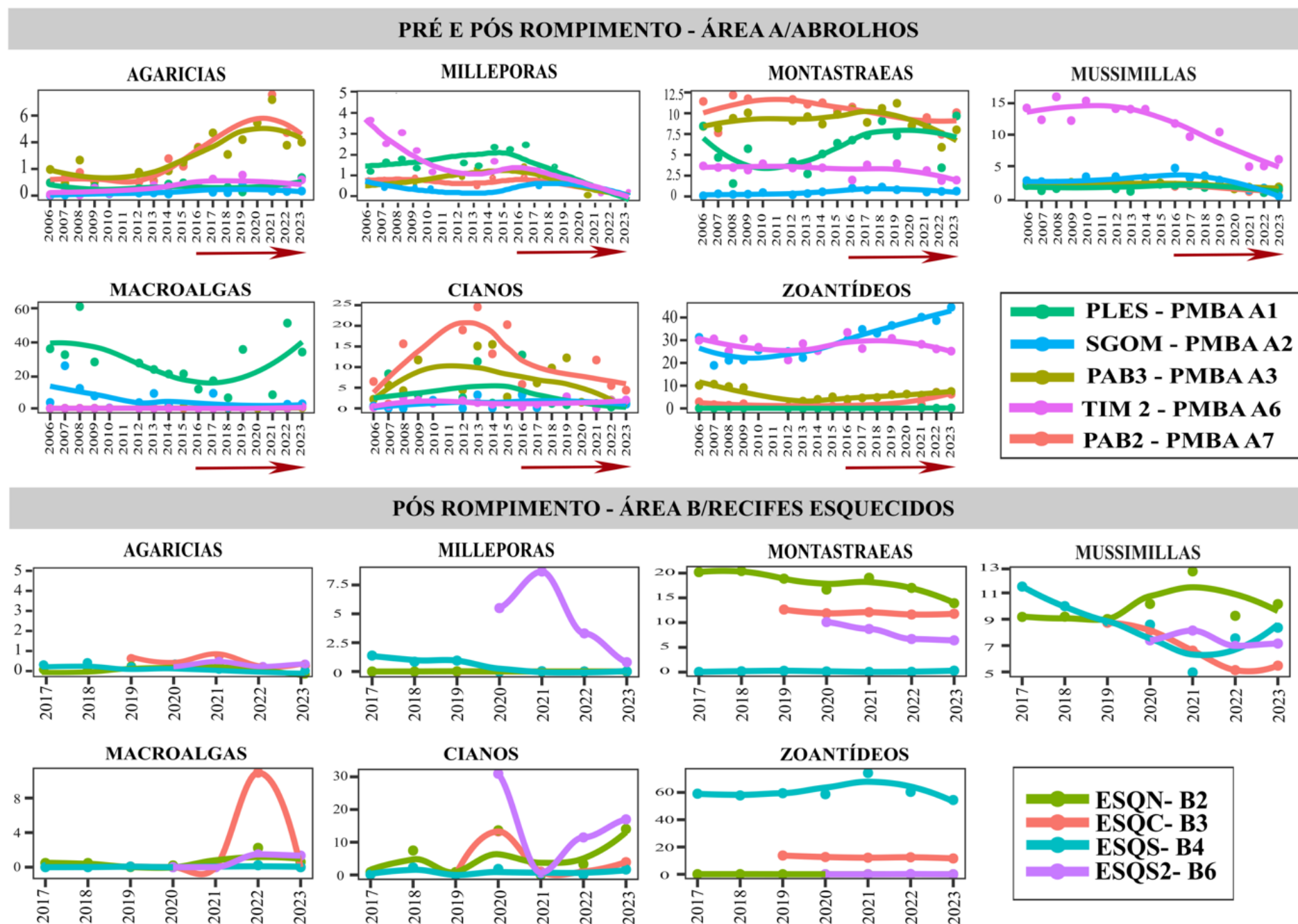


Figura 4: Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais benthicas. Cobertura percentual dos grupos funcionais de corais e outras categorias que compõem o indicador de cobertura benthica nos topos dos nove recifes abrangidos pelo PMBA/Fest (considerando dados antecedentes ao rompimento e ao PMBA/Fest, obtidos pelo PELD Abrolhos). Os anos após o rompimento (apenas para Área A) estão destacados com uma seta vermelha. Escalas de abundâncias diferem nos diferentes elementos dos painéis; curvas construídas com suavização de LOESS.



Uma vez demonstrado o efeito do rompimento na estrutura das comunidades recifais, buscamos identificar as alterações nas abundâncias de organismos, também usando a base de dados atualizada. Para isso, utilizamos plotagens múltiplas (*“shade plots”*) (Figura 3) complementando-as com gráficos de dispersão com suavização de LOESS (*“LOcally Estimated Scatterplot Smoothing”*) (Figura 4), uma abordagem não paramétrica de regressão. Em linhas gerais, a dinâmica temporal detalhada no relatório anterior (FEST, 2023) se manteve e, portanto, está apenas brevemente reapresentada a seguir.

Na maioria dos sítios, a cobertura relativa de corais do grupo funcional AGARICIAS, relativamente pequenos, de crescimento mais rápido e vida mais curta, tendeu a aumentar após o rompimento. A cobertura relativa grupo funcional MONTASTRAEAS (corais longevos com crescimento lento e esqueletos mais densos) tendeu a diminuir em todos os sítios após o rompimento, especialmente a partir de 2019 (i.e., antes do evento de branqueamento; TEIXEIRA et al. 2020). Um padrão semelhante de declínio também foi registrado para o grupo funcional MUSSISMILIAS (corais massivos e longevos), com inflexão a partir de 2018 ou 2019. Após o rompimento houve declínio do grupo funcional MILLEPORAS (hidrocorais ramificados de crescimento rápido), acelerado a partir de 2021 (q.v. TEIXEIRA et al., 2020). A cobertura por zoantídeos foi espacialmente heterogênea e temporalmente pontuada. A exceção foi o recife Sebastião Gomes (A2), onde houve aumento contínuo na cobertura desses organismos, associados a sítios rasos sob intensa sedimentação (TEIXEIRA et al. 2021). Não foi detectada associação entre as variações nas abundâncias de zoantídeos e o rompimento, possivelmente porque os impactos desse evento decorrem da dispersão de partículas pequenas e materiais dissolvidos, e não em função de aumento na deposição sedimentar. A participação de cianobactérias filamentosas também foi pontuada e possivelmente relacionada a variações meteocanográficas (RIBEIRO et al. 2018, 2022). A cobertura por macroalgas foi espacialmente heterogênea e relacionada com a proximidade à costa, com baixa cobertura nos sítios offshore e em Timbebas (A6). Nos recifes costeiros da Área A (A1 e A2) e em Esquecidos Norte e Central (B3 e B4), a variação na abundância relativa de macroalgas, embora pontuada, tendeu a aumentar depois de 2016 (pós-rompimento).

Figura 5 : Ortomosaicos de um sítio do Parcel dos Abrolhos (PAB2, A7) construídos com dados de 2021, 2022 e 2023. Além de fornecer um panorama geral da paisagem do fundo recifal, alterações na cobertura são facilmente visualizadas quando se destaca unidades menores de área (quadrados brancos).

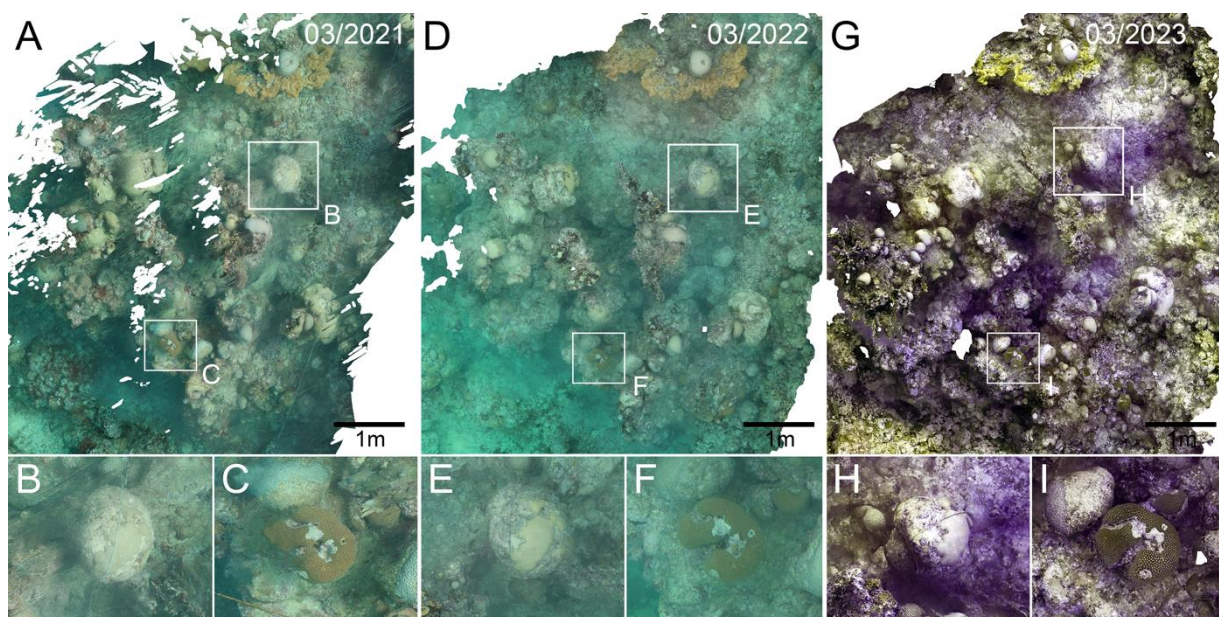


Figura 6 : Ortomosaicos de um trecho do recife Pedra de Leste (PLES, A1) construídos com dados de 2021, 2022 e 2023.

Além de fornecer um panorama da mudança expressiva na paisagem do fundo recifal, com “bloom” de macroalgas (Dyctiotacea) em 2022 e 2023, a mortalidade de corais também é visível nos destaques com unidades menores de área (quadrados brancos).

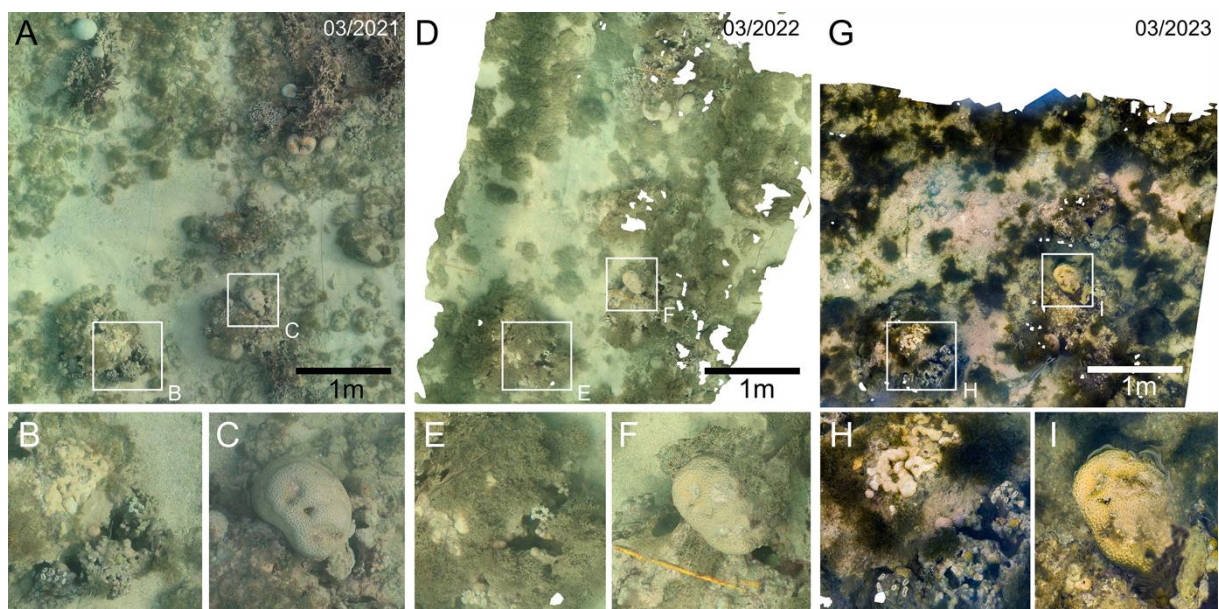


Figura 7 : Ortomosaicos de um trecho do recife Sebastião Gomes (SGOM, A2) construídos com dados de 2021, 2022 e 2023. Além de fornecer um panorama da mudança expressiva na paisagem do fundo recifal, o avanço dos zoantídeos sobre corais e hidrocorais é facilmente visualizado nos destaques com unidades menores de área (quadrados brancos).

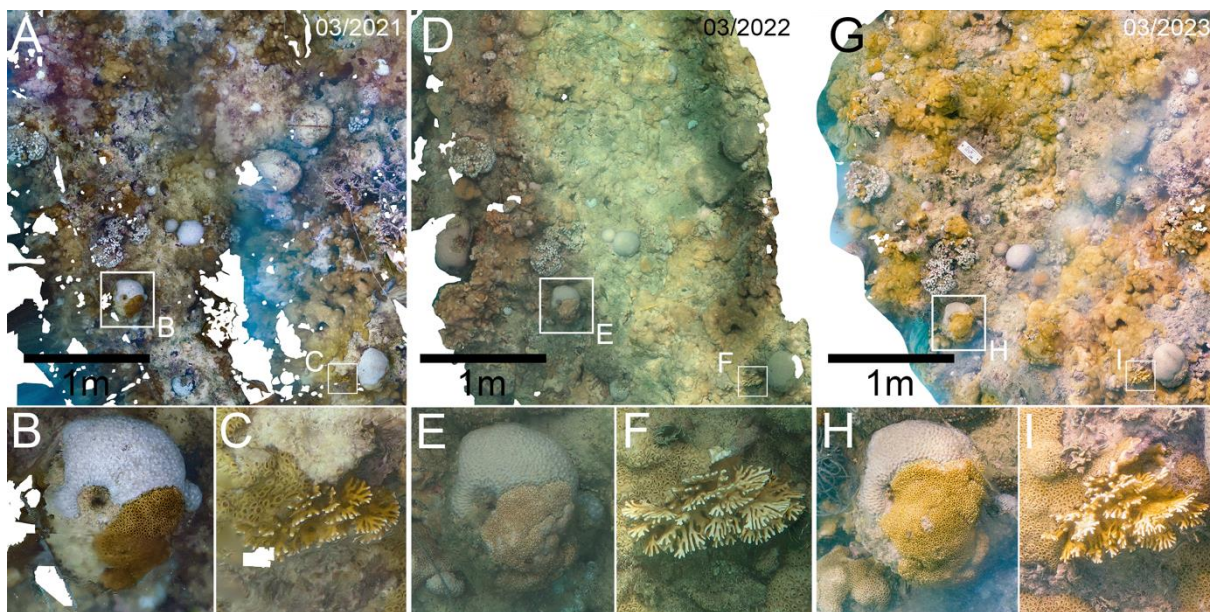


Figura 8 : Ortomosaicos de um trecho do recife Esquecidos Sul (ESQSUL, B4) construídos com dados de 2021, 2022 e 2023. Além de fornecer um panorama da paisagem do fundo recifal, com branqueamento parcial de corais entre 2021 e 2022, a mortalidade de corais é facilmente visualizada nos destaques de unidades menores de área (quadrados brancos).

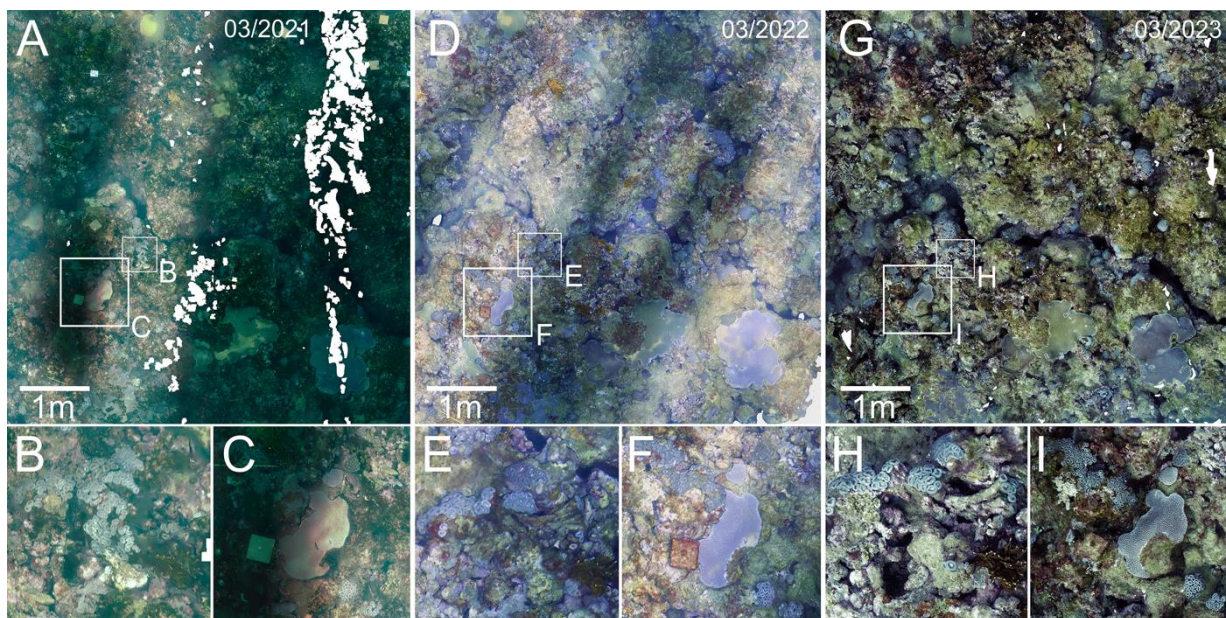
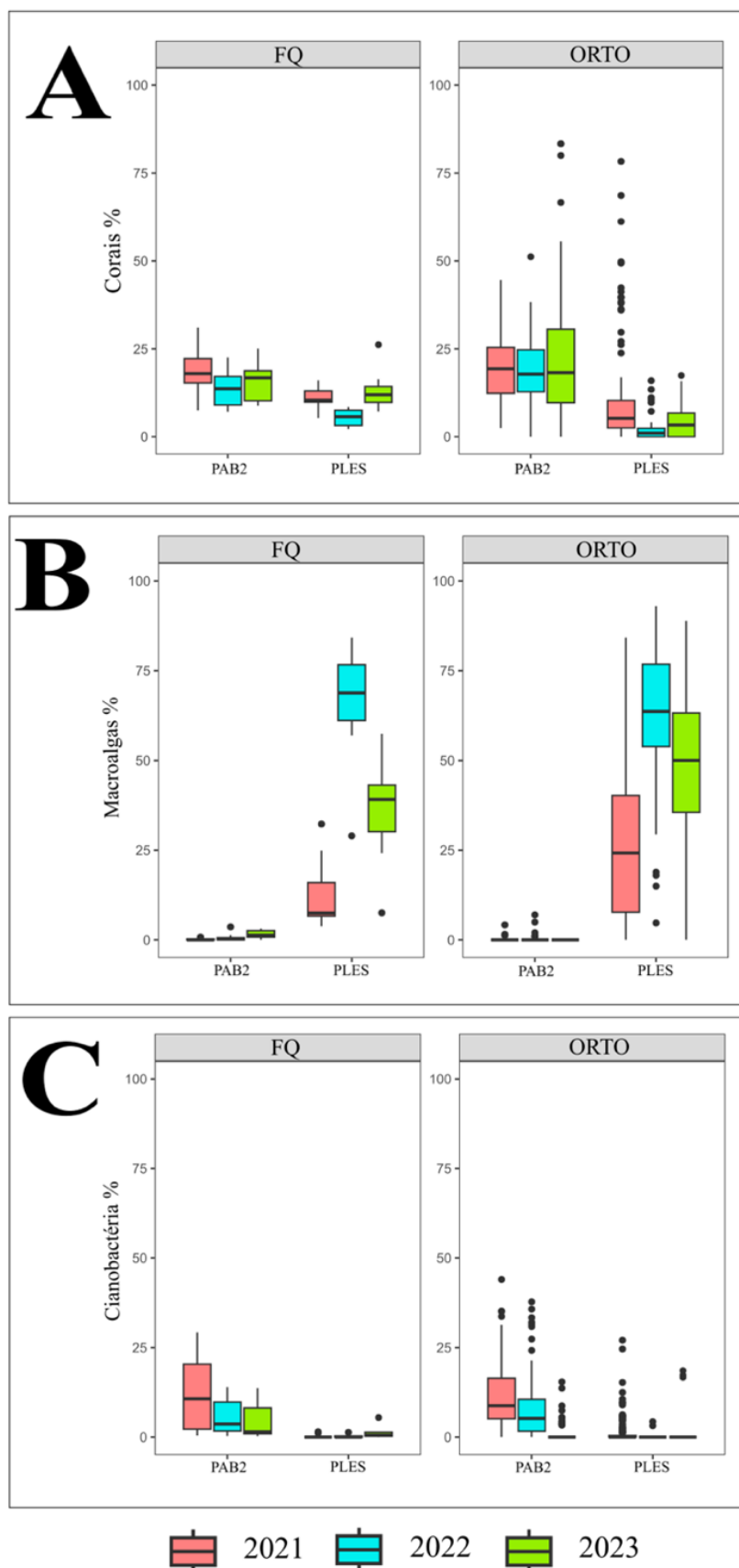


Figura 9 : Ortomosaicos. Contrastes temporais (2021-2023) na cobertura (%) por corais (A), macroalgas (B) e cianobactérias (C) em dois recifes [Pedra de Leste (A1) e Parcel dos Abrolhos (A7)] amostrados com fotoquadrados (FQ) e ortomosaicos (ORTO).



A amostragem com ortomosaicos abrange menos sítios e cobertura temporal mais restrita do que as amostragens com fotoquadrados, representando um componente complementar do estudo sobre a dinâmica recifal. No entanto, trata-se de abordagem promissora para monitoramento em longo prazo, possibilitando visualização rápida e holística da dinâmica de cobertura (detalhes em FEST, 2023). A otimização do monitoramento dos efeitos do rompimento da barragem sobre os recifes coralíneos é um tema relevante, uma vez que diversos indicadores têm apresentado piora, apontando para a necessidade de continuidade de um monitoramento otimizado.

Apresentamos aqui, resumidamente, uma primeira avaliação mais robusta de mudanças temporais com base em paisagens de quatro sítios imageados entre 2021 e 2023 (Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8), confirmando a capacidade dos ortomosaicos de discriminar a dinâmica de cobertura dos recifes, a qual converge com estimativas baseadas em fotoquadrados. Especificamente, o poder de discriminação de alterações temporais, tanto com ortomosaicos quanto com fotoquadrados, é equivalente para diversos grupos indicadores da saúde dos recifes (Figura 9). Com base na análise comparativa entre estimativas quantitativas, a variação nas coberturas de macroalgas (+) e corais (-) entre 2021 e 2023 para os sítios A1 (ANOVA de 2 fatores, $p < 0,0001$ para método e tempo) e A7 (ANOVA de 2 fatores, $F: p < 0,001$) foi igualmente detectada com ortomosaicos e fotoquadrados.

2.2 COBERTURA DE BANCOS DE RODOLITOS

Figura 10: Variação espaço-temporal e efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades. Diagramas de ordenação (nMDS) com todos os dados de cobertura dos bancos de rodolitos das áreas A (adjacências de Abrolhos), C (Foz do Rio Doce) e D (APA Costa das Algas). Os painéis A e B foram baseados na cobertura por grupos funcionais de algas e demais categorias de recobrimento e o Painel C na cobertura por grandes grupos taxonômicos e demais categorias. No Painel A estão sobrepostas as correlações de Pearson ($>0,5$) com os dados de cobertura percentual (sem transformação). Legenda Painel B: A=sedimentos, B=Fotossintetizantes filamentosos, C=Macroalgas foliosas corticadas, D=Macroalgas corticadas, E=Macroalgas coriáceas, F=Algas crostosas, G=Macroalgas foliáceas. Legenda Painel C: A=Chlorophyta, B=Ochrophyta, C=Rhodophyta, D=turf. As categorias menos discriminantes não foram mostradas para facilitar a visualização da estrutura das comunidades em cada estação amostral.

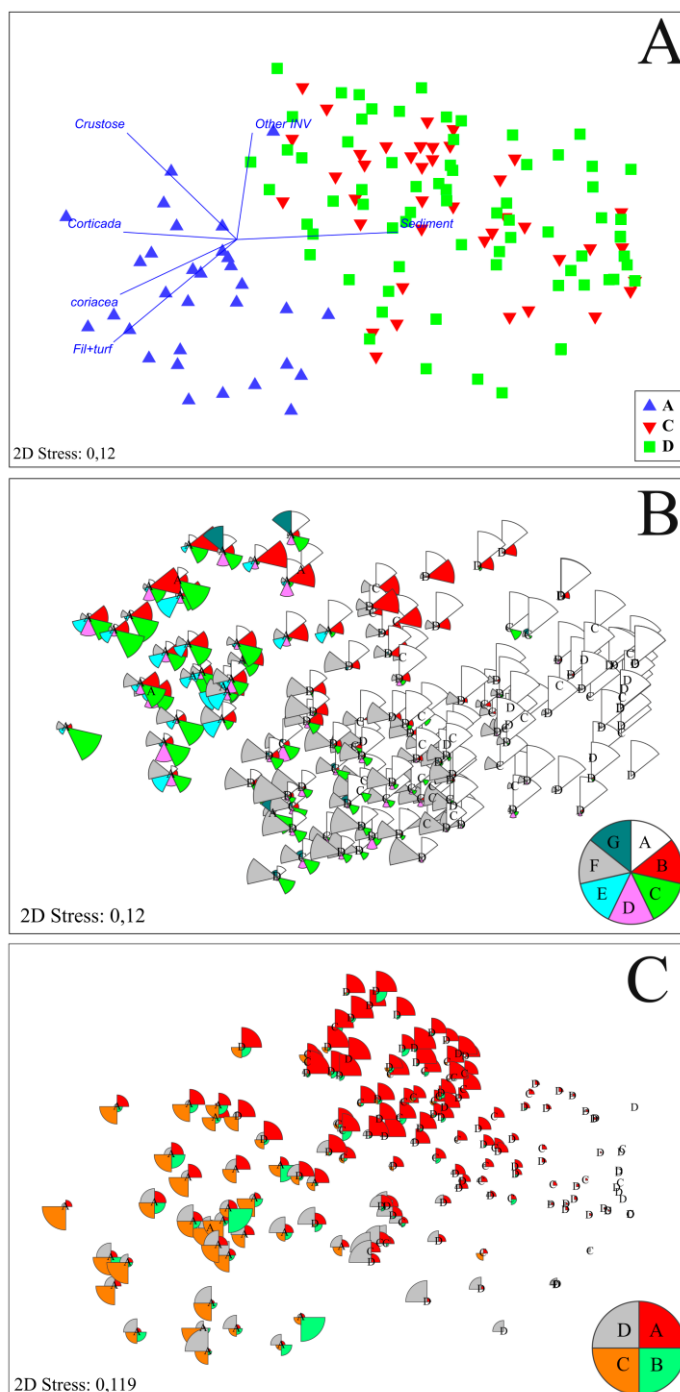


Figura 11: Variação espaço-temporal e efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades. Diagramas de ordenação (nMDS) com todos os dados de cobertura (grupos funcionais de algas e outras categorias) dos bancos de rodólitos da área A (adjacências de Abrolhos) obtidos após o rompimento da barragem. No Painel A estão sobrepostas as correlações de Pearson ($>0,5$) entre as posições das amostras no diagrama e as coberturas percentuais (sem transformação). Legenda Painel B: A=fotossintetizantes filamentosos, B=Macroalgas foliosas corticadas, C=Macroalgas corticadas, D=Macroalgas coriáceas, E=Algas crostosas; F=Macroalgas foliosas (algumas categorias não foram mostradas nas "pizzas" para facilitar a visualização dos padrões em cada estação).

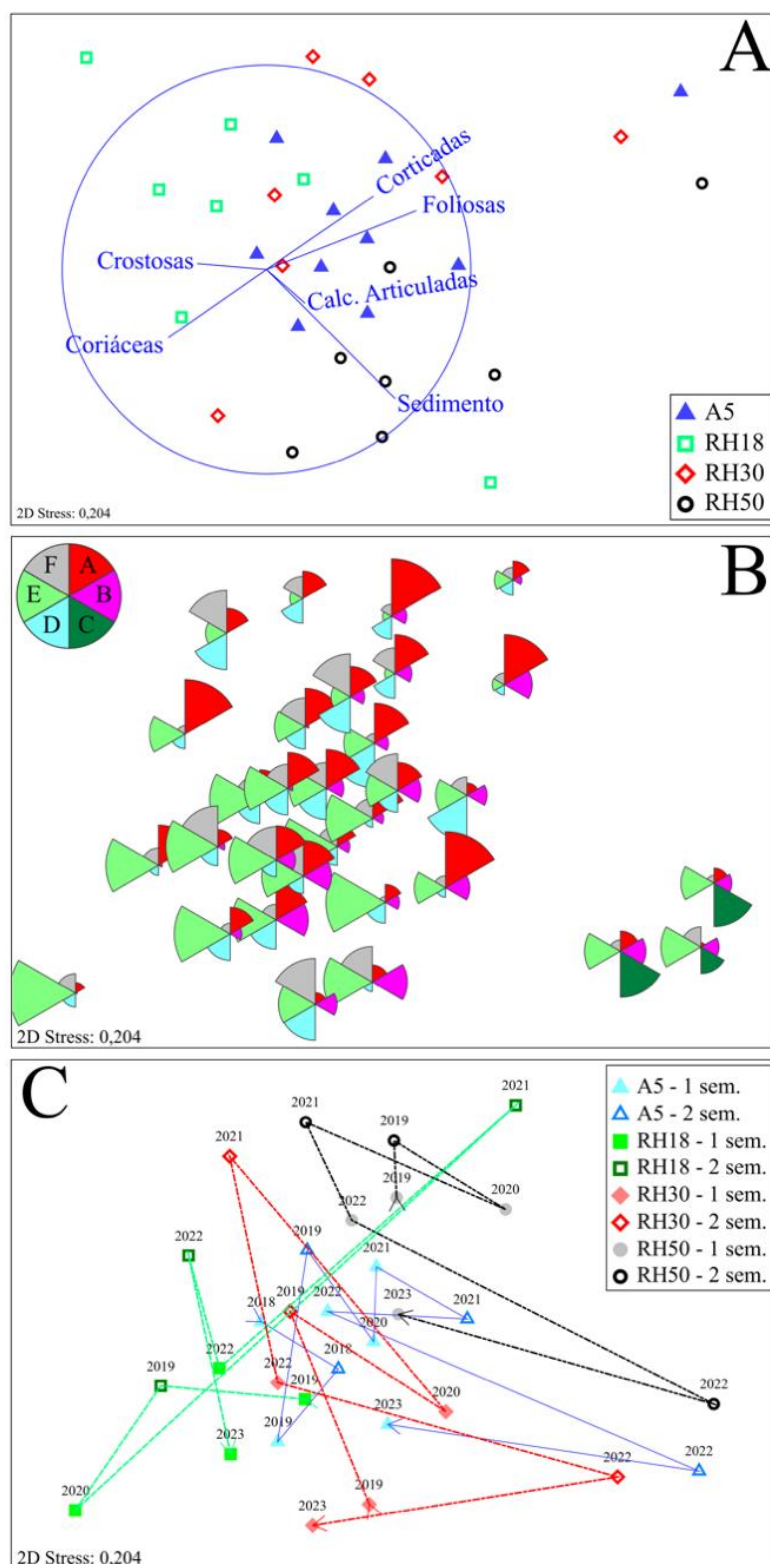
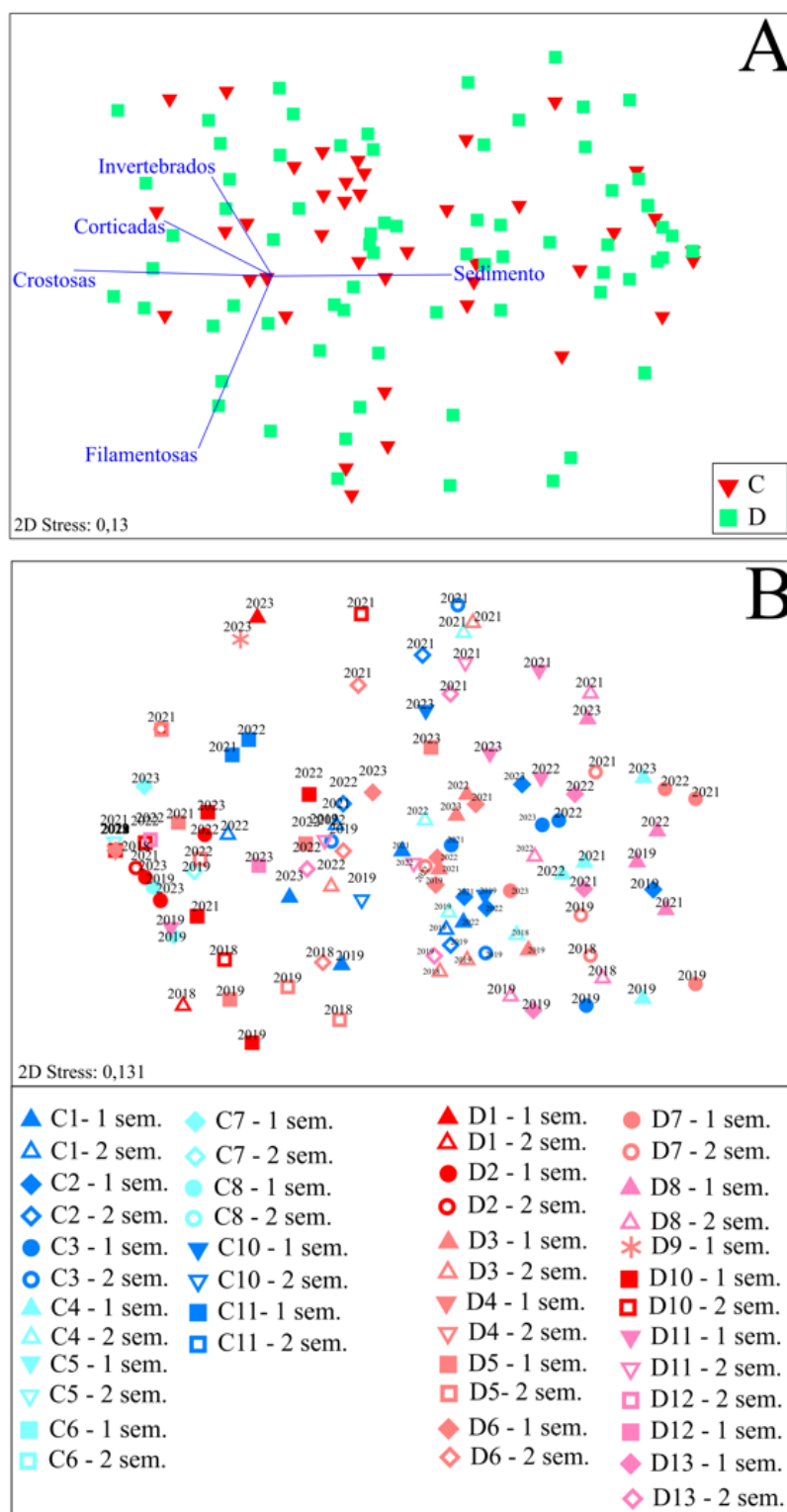


Figura 12: Variação espaço-temporal e efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades. Diagramas de ordenação (nMDS) com todos os dados de cobertura (grupos funcionais de algas e outras categorias de recobrimento) dos bancos de rodolitos das áreas C (Foz do Rio Doce) e D (APA Costa das Algas). Todos os dados foram obtidos após o rompimento da barragem. Painel A: sítios discriminados por área (C e D) com sobreposição das correlações de Pearson ($>0,5$) entre as posições relativas das amostras no diagrama e os dados de cobertura percentual (sem transformação). Painel B: amostras discriminadas por sítios e semestre (sem.).



Com o objetivo de auxiliar na compreensão dos resultados, vale resgatar que até o momento foram identificados 47 táxons de macroalgas associadas a rodolitos nas Áreas C e D (Foz do rio Doce e APA Costa das Algas, respectivamente), representando uma flora cerca de três vezes mais pobre do que aquela associada aos rodolitos das adjacências de Abrolhos (BRASILEIRO et al. 2016).

A primeira rodada de ordenações com dados de cobertura, disponíveis apenas para o período após o rompimento, visou examinar a variabilidade espacial ao nível dos sítios e áreas: 1) Área A (adjacências de Abrolhos, em malha “cross-shelf” entre 8 e 50 m de profundidade – pontos A5 e RH); 2) Área C (Foz do Rio Doce), plataforma externa; 3) Área D (APA Costa das Algas), plataforma média e externa.

As comunidades da Área A (adjacências de Abrolhos) continuaram se destacando por apresentarem dosséis expressivos de macroalgas, em oposição à expressiva cobertura sedimentar (i.e., menor densidade de nódulos) e maior contribuição de invertebrados sésseis (e.g., esponjas e briozoários) e macroalgas corticadas nas áreas C (Foz do Rio Doce) e D (APA Costa das Algas) (Figura 10A, Figura 10B). O diagrama de ordenação também continuou confirmando a maior similaridade entre os pontos das Áreas C e D, cujas amostras aparecem consistentemente sobrepostas. A despeito da ausência de linha de base, não há evidências que permitam associar esse contraste espacial [impacto (Áreas C e D) *versus* “controle” (Área A)] ao rompimento, confirmando a premissa de que possíveis alterações nessas comunidades, em decorrência do evento, devem ser endereçadas a partir de séries temporais representativas. Com relação à estrutura taxonômica (Figura 10C), os padrões descritos anteriormente se mantêm claros. Por exemplo, a Área A, com assembleias mais diversificadas e participação expressiva de algas pardas (Ochrophyta), segue contrastando com as áreas B e C, que apresentam assembleias menos diversificadas e participação expressiva de macroalgas vermelhas (Rhodophyta). Em todas as áreas, a participação de algas verdes seguiu relativamente baixa.

Ordenações (nMDS) considerando separadamente o recobrimento das áreas A (Figura 11) e C e D (Figura 12) não revelam variação espacial marcante, corroborando a ideia de que a “identidade” dos sítios é menor em bancos de rodolitos do que em recifes. No entanto, há variações espaciais consistentes, tais como a maior participação de algas crostosas nos sítios mais profundos (RH30 e RH50, 30 e 50 m de profundidade respectivamente) da Área A (Figura 13), aparentemente relacionada com dosséis algais menos expressivos.

Temporalmente, continuamos detectando menor variabilidade no sítio mais raso, A5, contrastando com sítios com variações mais acentuadas (e.g., RH50, RH18) (Figura 11A e C). Apesar da variação sazonal relevante, relacionada aos dosséis de macroalgas coriáceas (e.g., *Styopodium* spp. e *Sargassum* spp. em RH30) e corticadas (e.g., *Codium* spp. em RH18), seguimos sem detectar variação interanual significativa (PERMANOVA, n.s.; resultados não apresentados). Nas áreas C e D, a variação espacial e temporal foi menor. A maior fração de sedimentos parece atuar reduzindo a abundância de macroalgas, possivelmente em função de condicionar maior mobilidade aos nódulos e abrasão nas macroalgas, contribuindo para explicar a maior homogeneidade nas áreas C e D.

2.3 COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES ADJACENTES AO LITORAL DA APA COSTA DAS ALGAS

Figura 13: Contrastes pré e pós rompimento da barragem de Fundão no recobrimento por diferentes grupos funcionais de macroalgas nos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas. Os dois painéis representam visualizações alternativas do mesmo conjunto de dados.

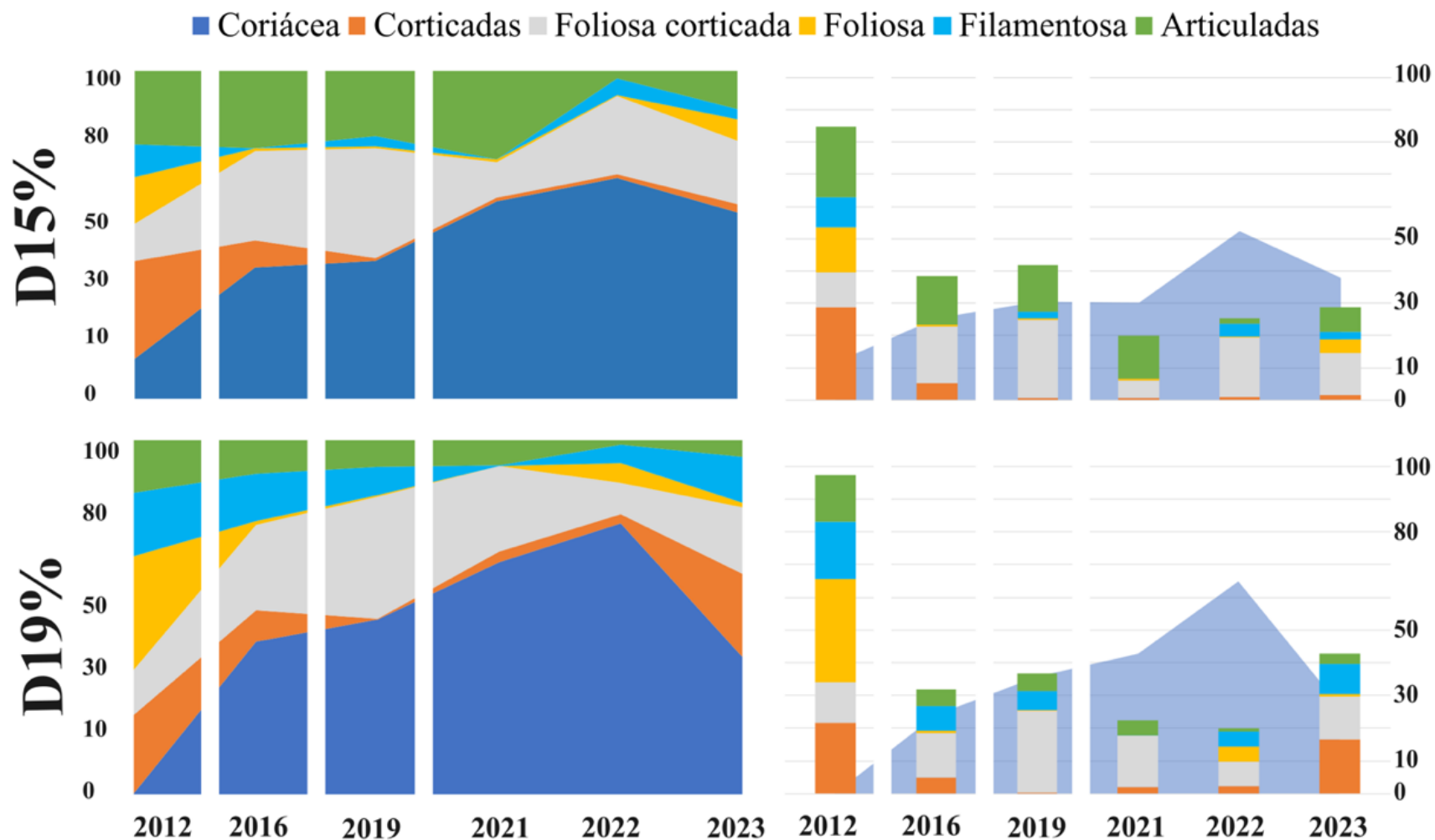
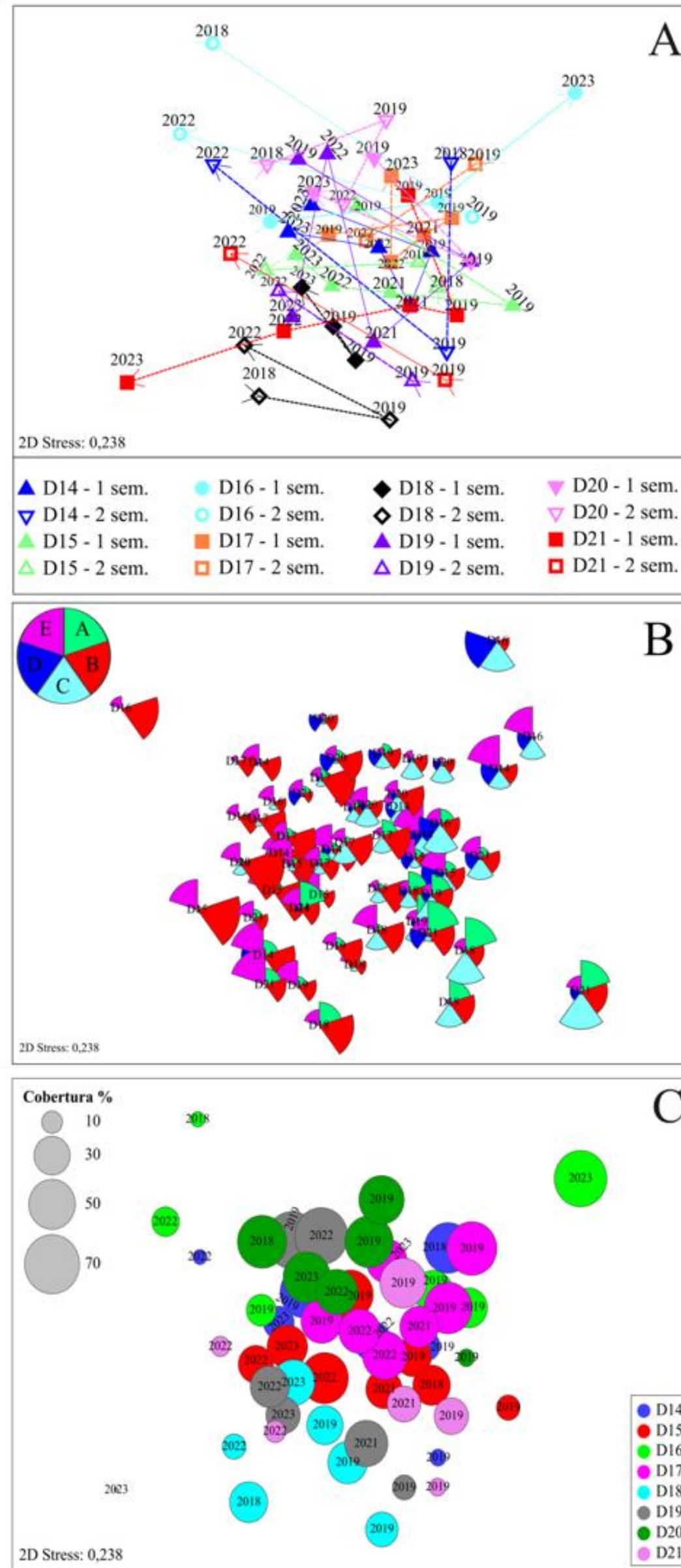


Figura 14: Diagramas de ordenação (nMDS) baseados em todos os dados de cobertura (grupos funcionais de algas e outras três categorias de recobrimento) dos recifes adjacentes ao litoral (APA Costa das Algas) após o rompimento da barragem. No Painel A as amostras estão categorizadas por semestre (sem.) e ligadas por um fio temporal com cabeças de seta indicando o início e fim de cada série. Alguns semestres possuem mais de duas amostras (amostragens trimestrais). O Painel B mostra a contribuição de cinco grupos funcionais de algas. Legenda para o painel B: A=Algas foliosas, B=Algas corticadas foliosas, C=Algas corticadas, D=Algas calcárias articuladas, E=fotossintetizantes filamentosos. O Painel C mostra a participação percentual de macroalgas coriáceas nos diferentes sítios (codificados por cores) e estações, revelando a menor contribuição desse grupo funcional nas últimas amostras da série temporal, para a maioria dos sítios.



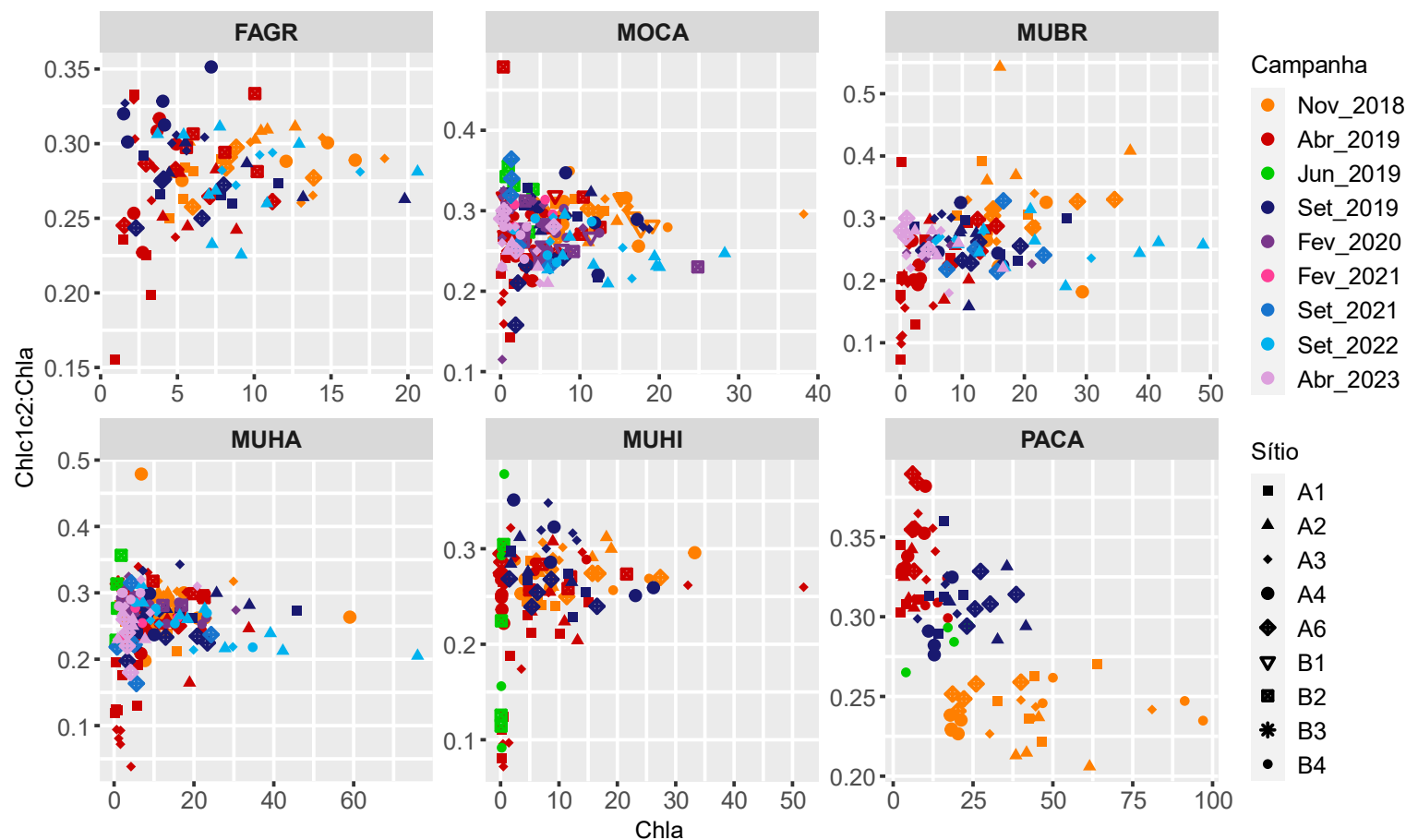
Aqui apresentamos a atualização do quadro sobre a cobertura dos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas, baseada primariamente em grupos funcionais de macroalgas (oito sítios).

Dados quantitativos sobre as comunidades bênticas da APA Costa das Algas, pretéritos ao rompimento da barragem, são escassos. A região foi alvo de estudos comparáveis em 2012 (pré-rompimento) (SCHERNER et al., 2013) e 2016 (logo após o rompimento) (GOLDER, 2016), em apenas dois dos sítios monitorados após o evento (D15 e D19) (detalhes em RRDM (2022)). Assim, restringimos os contrastes pré *versus* pós rompimento a esses dois sítios (Figura 13), utilizando apenas dados do primeiro semestre no sentido de controlar efeitos sazonais (a sazonalidade foi extensivamente discutida em relatórios anteriores; e.g., FEST, 2023). Além disso, utilizamos apenas a fração de cobertura relativa por macroalgas, desconsiderando outras categorias de recobrimento. Vale ressaltar que as macroalgas são os elementos dominantes nos recifes rasos com crostas lateríticas na chamada “Costa das Algas”, região com a maior diversidade florística do Atlântico Sul (FEST, 2023).

Os contrastes confirmaram duas tendências temporais relevantes para a avaliação dos efeitos do rompimento (Figura 13): 1) aumento na participação relativa de algas coriáceas, especialmente *Sargassum* spp., após o rompimento, com consequente redução na diversidade; 2) tendência recente, entre 2022 e 2023, de recuperação, especialmente no sítio D19. O aumento na participação de *Sargassum* spp. (efeitos diretos), bem como a redução competitiva na cobertura por outros grupos de algas (efeitos indiretos), são os dois principais aspectos da alteração temporal (Figura 13), cujos mecanismos potenciais foram explorados nos relatórios anteriores.

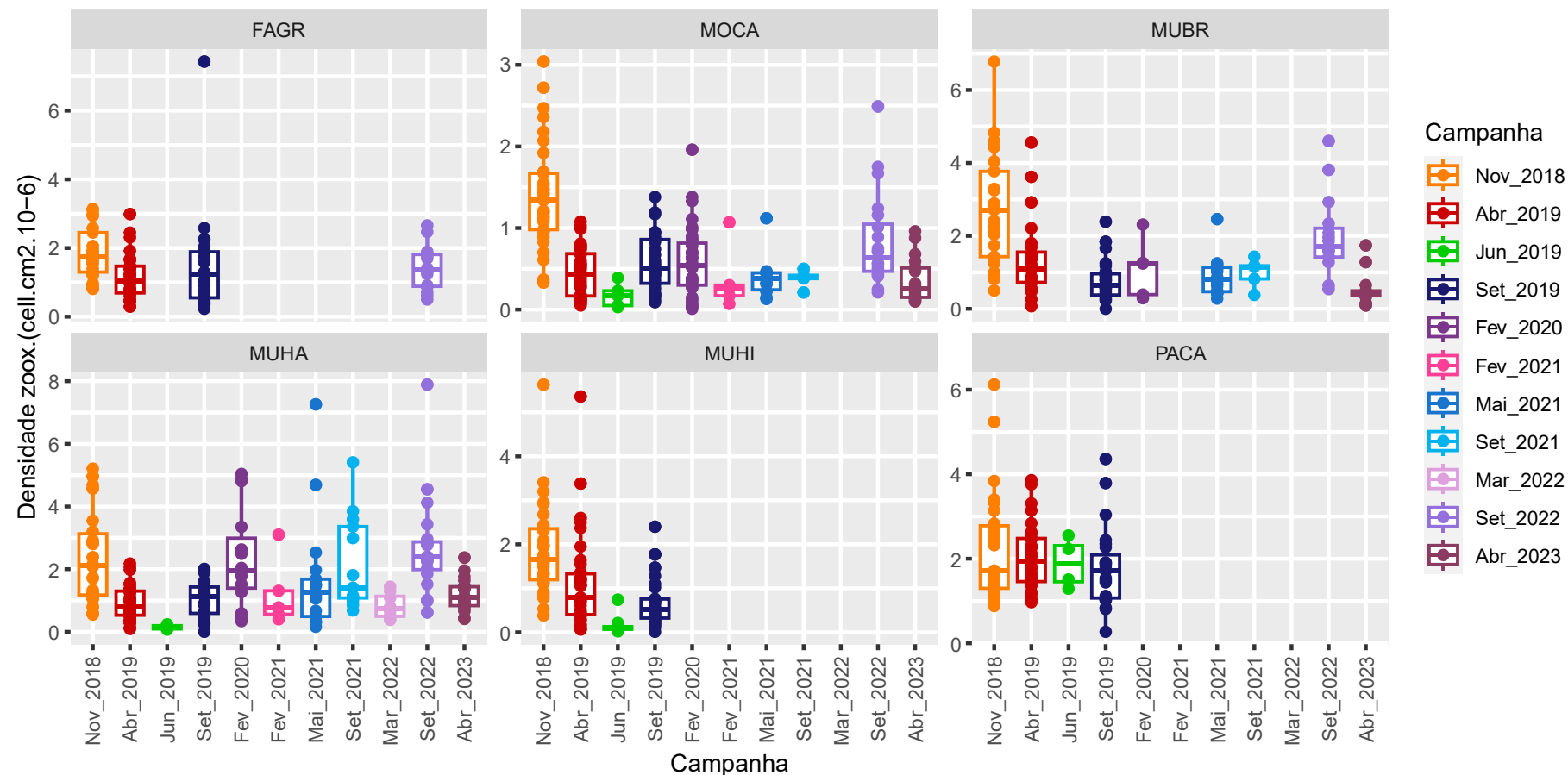
Sobre a variação espaço-temporal na estrutura das comunidades após o rompimento, assim como nas comunidades dos bancos de rodolitos, também dominadas por macroalgas (veja Figura 11 e Figura 12), os oito sítios adjacentes ao litoral apresentaram menor “identidade” em relação aos recifes coralíneos (áreas A e B). Em geral, as amostras se sobrepuseram no diagrama de ordenação (Figura 14A), com exceção do sítio D18, no qual a presença marcante de macroalgas corticadas se manteve ao longo de quase todo o período amostral (Figura 14B). Além de possuir a maior fração de sedimentos (cerca de 30%), D16, o mais variável dos oito sítios amostrais, apresentou presença marcante de fotossintetizantes filamentosos e algas foliosas. No geral, maiores contribuições de algas foliosas parecem estar relacionadas com maiores variabilidades temporais. A variação na contribuição de macroalgas coriáceas, que diferiu entre sítios, também ficou evidente nos diagramas de ordenação com todos os dados (Figura 14C).

Figura 16: Razão de clorofilas $c1$ e $c2$ de zooxantelas por concentração de clorofila a , em função da clorofila a . Cores = campanha e símbolos = táxons. FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastrea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *Mussismilia harttii*, MUHI = *Mussismilia hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*.



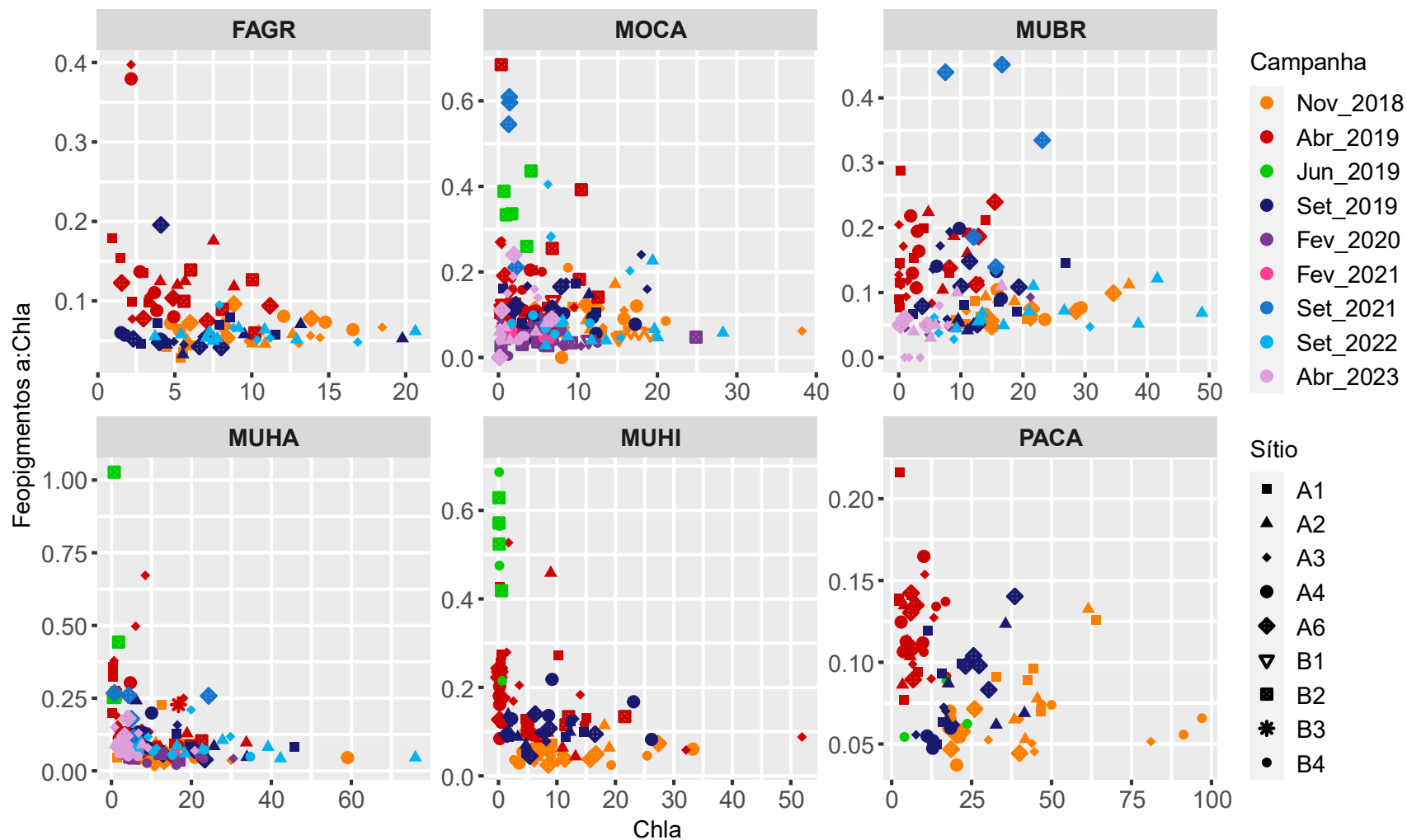
A concentração de clorofila *a* por unidade de área dos corais variou aproximadamente duas ordens de grandeza, com os menores níveis registrados em abril de 2019 (Figura 16), durante a anomalia térmica associada ao branqueamento em massa de corais. Tais reduções nas concentrações de pigmentos clorofilianos (clorofilas *a* e *c₂*) estão associadas a processos de foto-oxidação, redução nas densidades de zooxantelas (AMBARSARI et al., 1997; VENN et al., 2006) e redução na concentração de pigmentos (KLEPPEL et al., 1989). As espécies mais afetadas foram *M. cavernosa*, *M. braziliensis* e *P. caribeorum* que, em comparação com novembro de 2018, apresentaram decréscimos de mais de 70% na concentração de clorofila *a*. Outras espécies de corais também foram afetadas, com redução acima de 40% na biomassa clorofiliana. Após esse evento, as concentrações de clorofila oscilaram menos, tendo ficado MAIS próximas das modas para cada espécie. Os valores de abril de 2023 foram dentro da normalidade para as 3 espécies monitoradas (*M. cavernosa*, *M. braziliensis* e *M. hartii*).

Figura 17: Densidade celular de zooxantelas por área de tecido do hospedeiro por campanha. FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastrea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *M. hartii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*



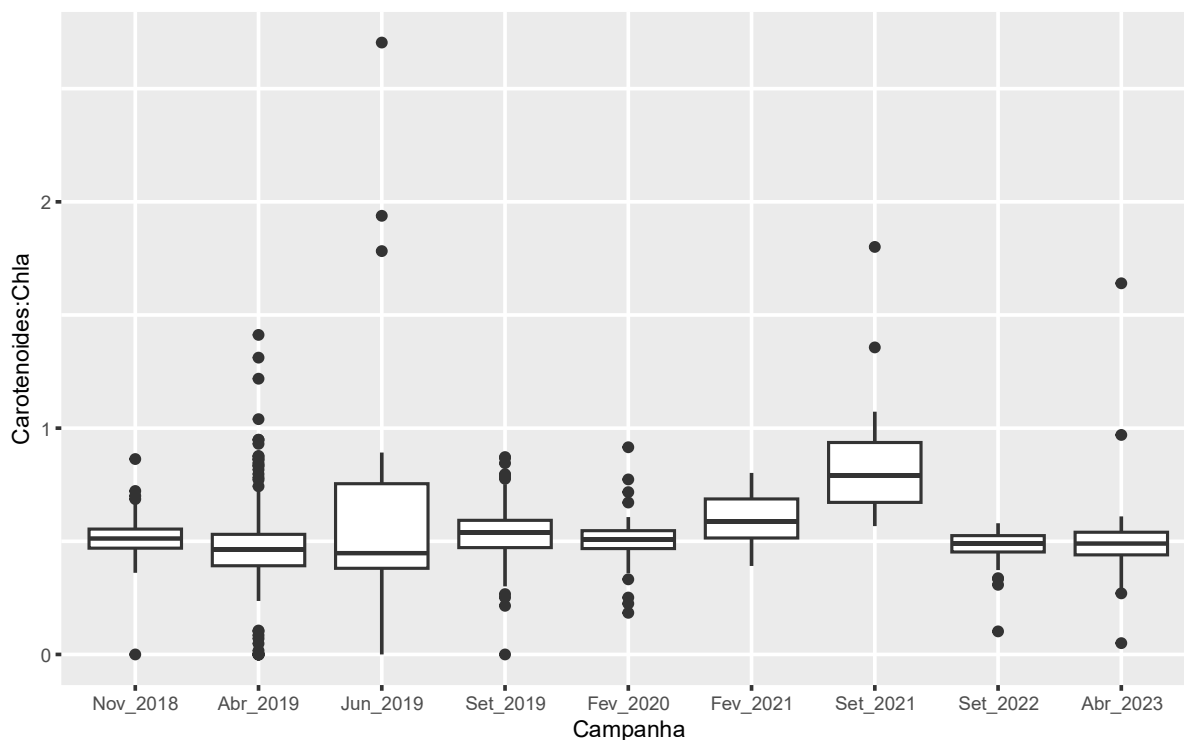
De maneira geral, as variações temporais nas concentrações de clorofila *a* são convergentes com as densidades de zooxantelas, que também apresentaram redução acentuada durante o branqueamento, seguidas por aumentos subsequentes (ver Figura 17). Assim como observado nas variações temporais das concentrações de clorofila *a*, as razões clorofilas c_1+c_2 /clorofila *a* (exceto em *P. caribaeorum*) decresceram em abril de 2019 (Figura 16). Esta redução parece ter sido mais associada a uma queda na densidade de zooxantelas (Figura 17) do que à degradação das clorofilas c_1+c_2 em relação a clorofila *a*, visto que as vias de degradação e os efeitos sobre cada pigmento são os mesmos. Assim, as reduções nas concentrações desses pigmentos pela degradação devem ser equivalentes, o que não alteraria as proporções entre eles.

Figura 18: Razão de feopigmentos de zooxantelas por concentração de clorofila *a*, em função da clorofila *a*. Cores = campanha e símbolos = táxons. FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastrea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *M. harttii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*



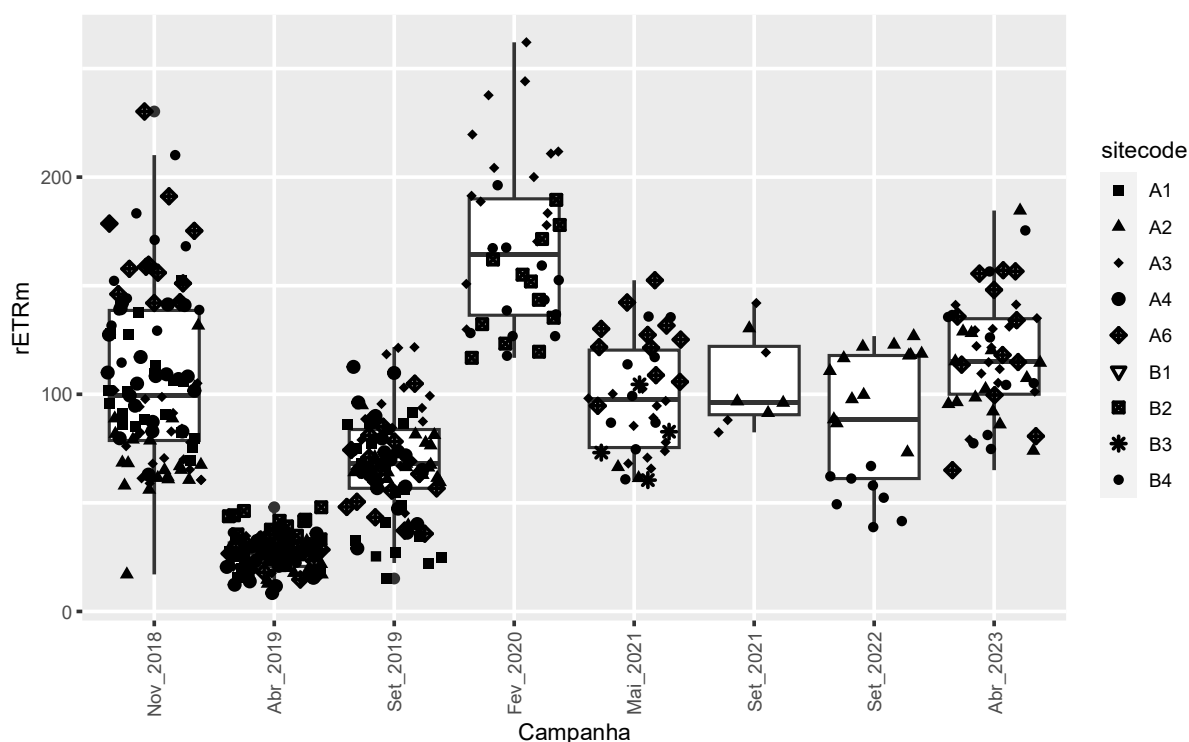
No início do monitoramento (novembro de 2018), as razões feofitina *a*/clorofila *a* apresentaram valores relativamente baixos ($< 0,10$) em mais de 75% dos espécimes (Figura 18), indicando bom estado fisiológico das zooxantelas. Contudo, em abril de 2019 as razões foram, em média, duas vezes maiores, com maiores valores associados a menores concentrações de Chla. Este resultado indica degradação no estado fisiológico das zooxantelas e mostra que a degradação da clorofila *a* em feopigmentos contribuiu com a forte redução da biomassa clorofiliana em abril de 2019. Este quadro corrobora as análises de capacidade fotossintética de zooxantelas, que apontam para degradação dos fotossistemas durante estresse térmico e branqueamento em massa. Em setembro de 2019 e fevereiro de 2020 as razões feofitina *a*/clorofila *a* diminuíram e atingiram níveis similares aos de novembro de 2018. No entanto, em setembro de 2021 e setembro de 2022 observou-se alta proporção de feopigmentos em *M. cavernosa* e *M. braziliensis*, podendo ser um indicativo de stress fisiológico cujas causas não puderam ser estabelecidas. Em abril de 2023 as razões voltaram a ser baixas, indicando melhor saúde. Relação causal de oscilações espaço-temporais desse indicador de saúde fisiológica dos corais com a contaminação pelos rejeitos não pode ser indubitavelmente estabelecida no momento, dependendo de séries temporais mais longas.

Figura 19: Proporção de carotenoides totais em relação a clorofila *a* nos corais ao longo do monitoramento.



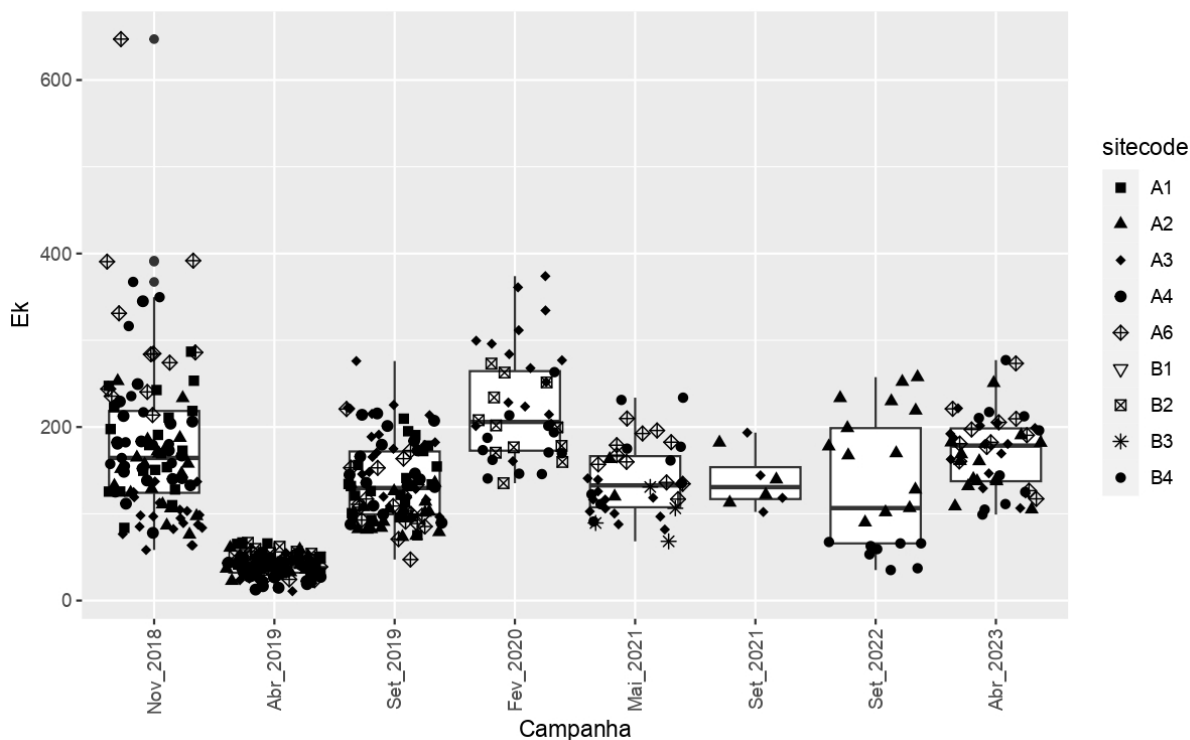
A razão carotenoides totais : Chla apresentou médias em torno de 0,5 durante a maior parte do monitoramento (Figura 19), com valores extremos em alguns indivíduos, principalmente nas campanhas de 2019, provavelmente relacionados à anomalia térmica que levou ao evento de branqueamento. Uma elevação na média da proporção de carotenoides foi observada em setembro de 2021, com valores elevados em espécimes de *M. cavernosa* e *M. braziliensis*. Os dados de setembro de 2022 e abril de 2023 indicam retorno à normalidade.

Figura 20: Fotobiologia. Evolução temporal da capacidade fotossintética (fluxo máximo de transporte de elétrons, rETRm) dos corais em sítios das áreas A e B.



Na campanha de fevereiro de 2020 foram observados os maiores valores de rETRm (capacidade fotossintética máxima do fotossistema) (Figura 20). A campanha de abril de 2023 mostrou valores mais elevados que as 3 campanhas anteriores, mas ainda abaixo do verão de 2020 (Figura 20). Valores mais elevados são esperados para verões típicos pela relação direta com a irradiância e inversa com a profundidade ótica (ILUZ & DUBINSKY, 2015; SCHEUFEN et al., 2017). Em abril e setembro de 2019 os valores baixos estão associados à anomalia térmica positiva severa que levou ao branqueamento em massa de corais (DUARTE et al., 2019; FEST, 2023). Com fotossistemas sob menor estresse oxidativo, a partir de fevereiro de 2020, ficou evidente a menor capacidade fotossintética em maiores profundidades óticas, tal como observado nos Recifes Esquecidos (sítios B2 e B4) (Figura 20).

Figura 21: Fotobiologia. Evolução temporal da Irradiância mínima saturante (E_k), indicativo da capacidade de fotoaclimação de corais, em sítios das áreas A e B.



Os valores mais altos de irradiância mínima saturante (E_k , fluxo máximo de energia suportado pelo fotossistema, indicador da capacidade de fotoaclimação do organismo) foram observados em novembro de 2018 seguido de abril de 2023 nos sítios com menor profundidade ótica (Figura 21). Notavelmente, houve decréscimo de todos os valores de E_k em abril de 2019, em todos os táxons, quando os corais estavam branqueados. Assim como observado nas medidas de $rETR_m$, os fotossistemas se recuperaram em fevereiro de 2020 e mantiveram valores no nível pré - anomalia térmica até a campanha de abril de 2023. Dentro do esperado, o fluxo máximo de energia suportado pelos fotossistemas, que é menor nas maiores profundidades óticas, foi menor nos sítios da Área B (Figura 21).

De forma geral, ao longo dos quase 5 anos do monitoramento, indicadores baseados em variáveis da fotobiologia dos simbiontes dos corais mostram certa estabilidade, quebrada durante a severa anomalia térmica. Os resultados até abril de 2023 mostram uma tendência de menor variabilidade, tanto para ETR_m quanto para E_k .

2.5 DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS

Figura 22: Composição da comunidade microbiana de diferentes espécies de corais (FAGR: *Favia gravida*; MOCA: *Montastraea cavernosa*; MUBR: *Mussismilia braziliensis*; MUHA: *Mussismilia hartii*) e diferentes sítios amostrados (base dos gráficos). As barras superiores indicam linhagens de simbiontes dinoflagelados da família Symbiodiniaceae e as barras inferiores indicam as classes mais abundantes na composição da comunidade bacteriana.

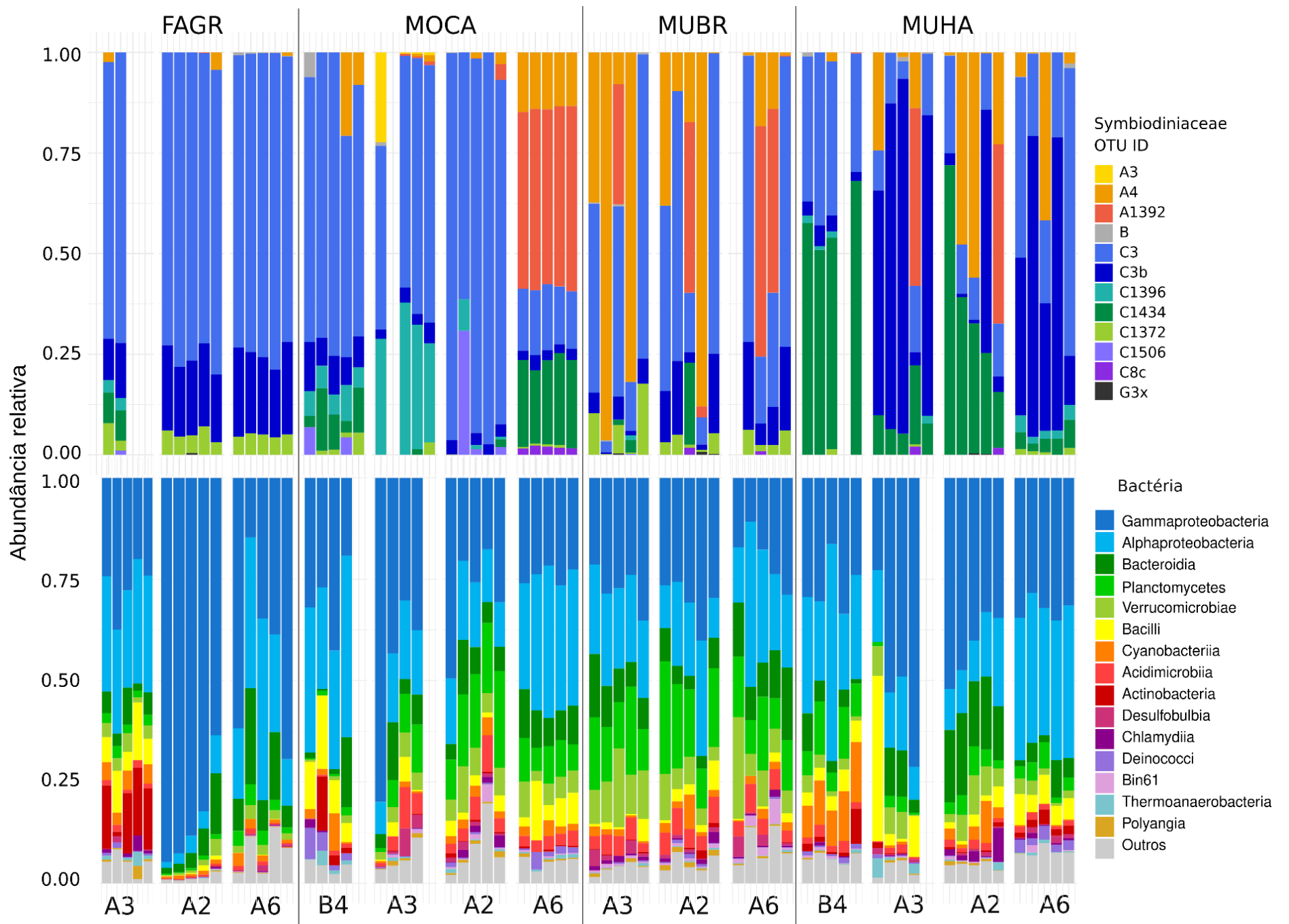
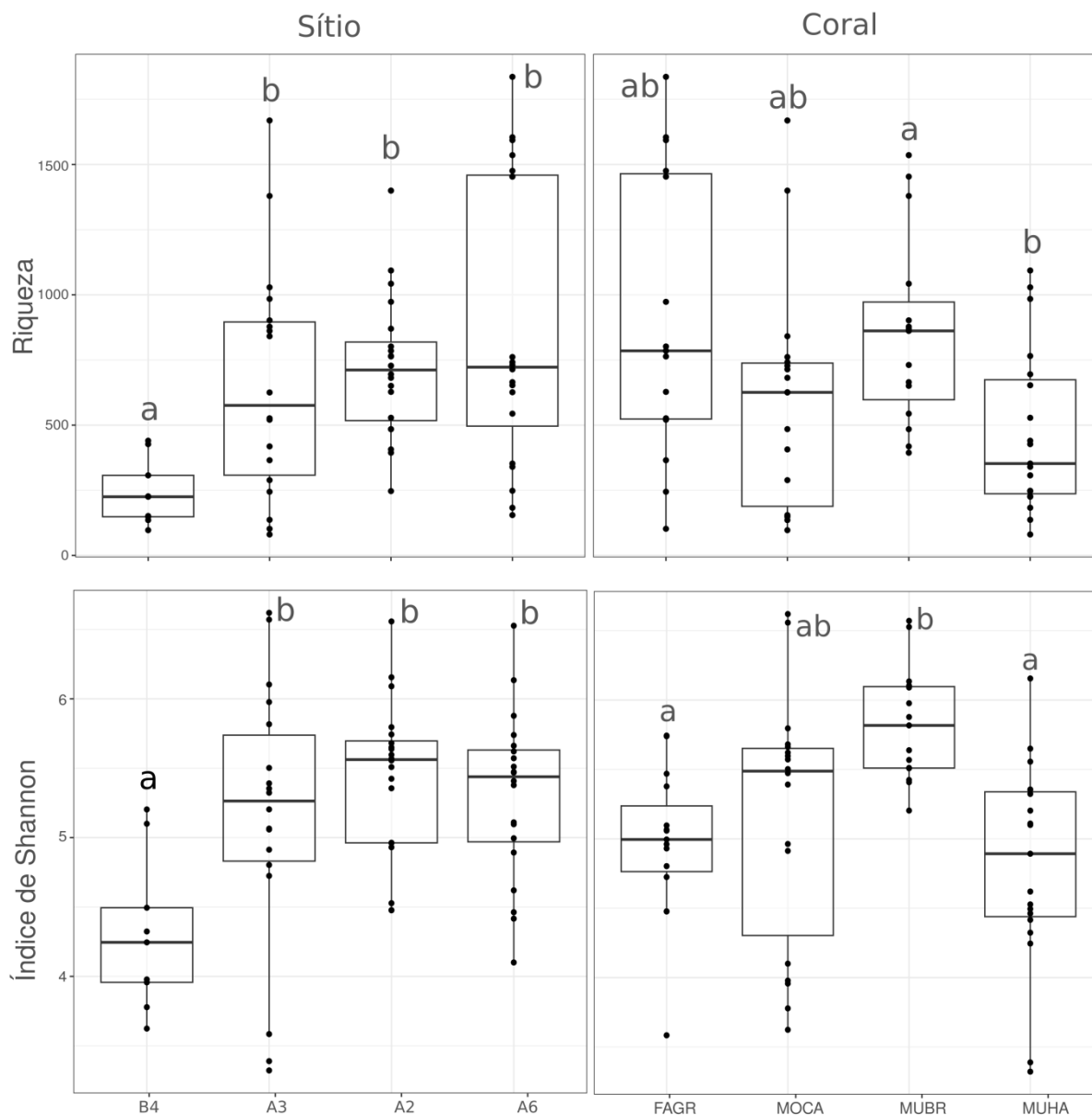


Figura 23: Riqueza e diversidade (índice de Shannon) da comunidade bacteriana por sítio e espécie de coral (FAGR: *Favia gravida*; MOCA: *Montastrea cavernosa*; MUBR: *Mussismilia braziliensis*; MUHA: *Mussismilia hartii*). Letras acima das barras indicam diferenças significativas ($p < 0.05$) após correção de comparações múltiplas (BH).



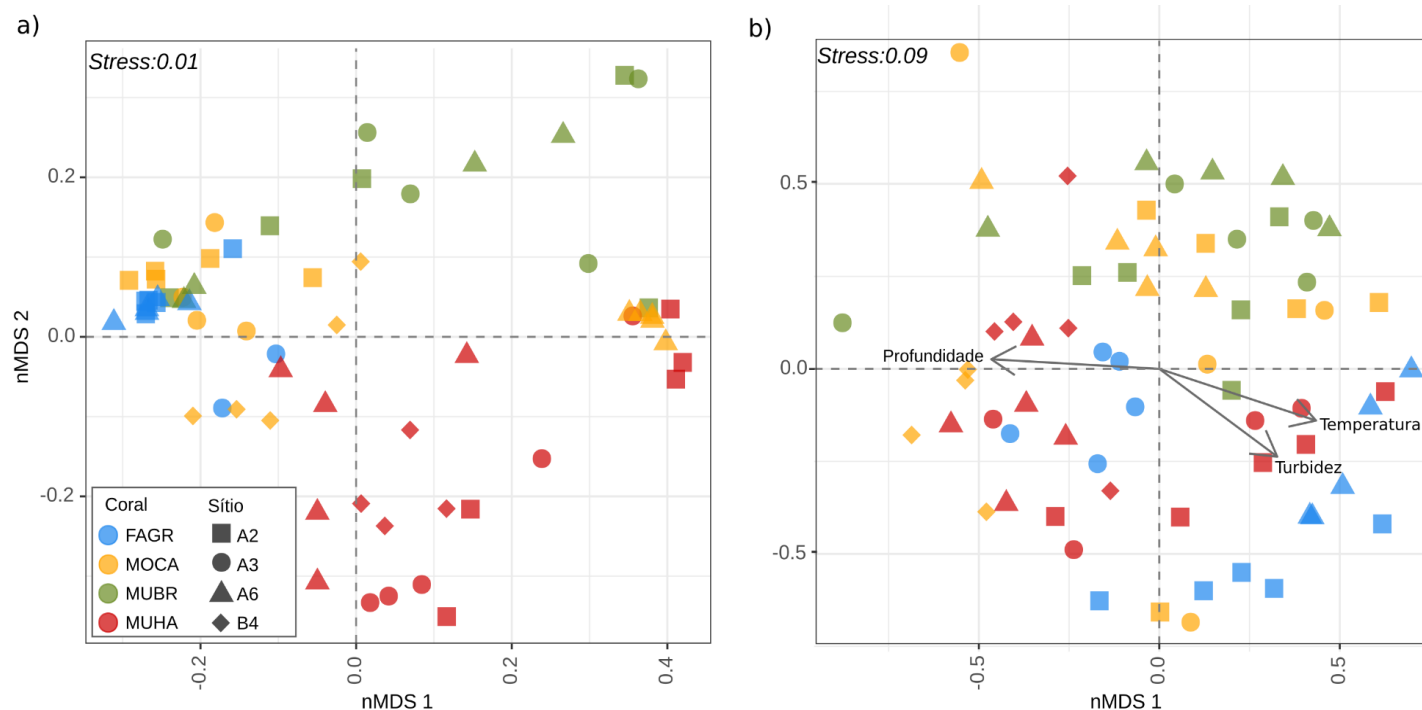
A diversidade genética de zooxantelas e de Bactérias associadas aos corais nas áreas A (Abrolhos) e B (Recifes Esquecidos) foi determinada em um conjunto de 64 e 67 espécimes de corais, respectivamente, pertencentes a quatro espécies: *Mussismilia braziliensis*, *M. hartii*, *Montastrea cavernosa* e *Favia gravida* (Figura 22) (FEST, 2023). Esses dados representam uma base de comparação para o diagnóstico da evolução temporal da diversidade destes componentes.

Conforme relatado anteriormente (FEST, 2023) a análise genética de zooxantelas revelou os gêneros *Cladocopium* e *Symbiodinium* como os mais abundantes (Figura 22), com diferenças na composição em relação à espécie do coral hospedeiro, sendo *F. gravida* dominada por *Cladocopium*, e ambas as espécies do gênero *Mussismilia* com composição bastante variável.

A análise da comunidade bacteriana revelou Gammaproteobacteria como a classe mais abundante, seguido de Alphaproteobacteria (Figura 22). De forma geral, neste nível taxonômico a comunidade bacteriana foi mais homogênea entre hospedeiros e sítios quando comparado com a variação dos haplótipos de zooxantelas.

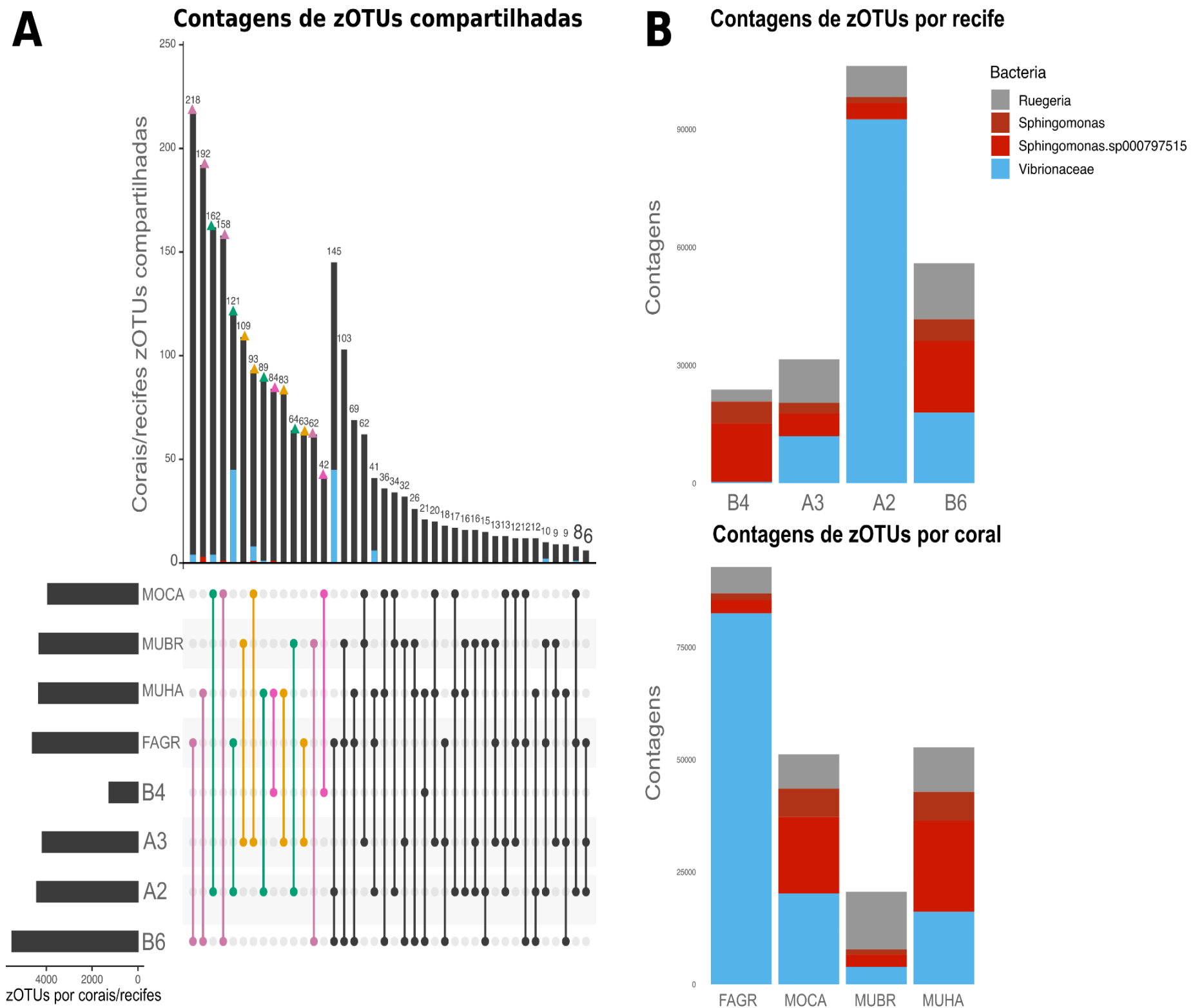
Os dados gerados para as comunidades bacterianas mostram índices de riqueza e diversidade significativamente menores em Esquecidos Sul ($p < 0,05$) em relação aos demais sítios estudados (Figura 23).

Figura 24: Ordenação não métrica multidimensional (nMDS) da diversidade das comunidades a) Symbiodiniaceae (ITS2), e b) bacteriana (16S rRNA) baseado em distâncias de Bray-Curtis. As cores indicam a espécie de coral (FAGR: *Favia gravida*; MOCA: *Montastraea cavernosa*; MUBR: *Mussismilia braziliensis*; MUHA: *Mussismilia harttii*) e os símbolos indicam os sítios amostrados. Resultados de PERMANOVA demonstram efeito significativo de ambos os fatores. Valores para *Symbiodiniaceae*: Coral = 0,31; Recife = 0,10. Valores para bactérias: Coral = 0,11, Recife = 0,14. Variáveis ambientais com correlação significativa ($p < 0,05$) discriminadas no nMDS da comunidade bacteriana (b): profundidade = 0,26; temperatura = 0,23; turbidez = 0,15.



O táxon do hospedeiro e o sítio apresentaram efeitos significativos sobre a composição das comunidades de zooxantelas e bactérias (Figura 24). Uma análise de correlação entre a estrutura das comunidades e variáveis ambientais indicou efeito da temperatura (0,23), turbidez (0,15) e profundidade (0,26) na comunidade bacteriana.

Figura 25: zOTUs bacterianas compartilhadas entre espécies de corais e sítios recifais. A) Número total de zOTUs compartilhadas em diferentes interseções. As frações coloridas das barras correspondem aos taxa *Vibrionaceae* (azul) e *Shingomonas* (vermelho). As linhas verticais abaixo das barras as correlacionam com as interseções nos quais as zOTUs são compartilhadas, conforme indicação nas barras horizontais à esquerda. As cores das linhas verticais indicam os sítios das interseções: lilás (B6), verde (A2), amarela (A3) e azul (B4). B) Número por sítios de zOTUs pertencentes aos grupos taxonômicos prevalentes no total das amostragens. FAGR: *Favia gravida*; MOCA: *Montastraea cavernosa*; MUBR: *Mussismilia braziliensis*; MUHA: *M. harttii*.



Análises das zOTUs bacterianas (proxy de espécie) compartilhadas entre hospedeiros e sítios (Figura 25A) mostraram maior número de zOTUs compartilhadas entre um hospedeiro e um sítio para o coral *F. gravida* no sítio costeiro Timbebas (B6), e o menor número de zOTUs compartilhadas em *M. cavernosa* em Esquecidos (B4), sítio que apresentou os menores índices de riqueza e diversidade (Figura 22). Os taxa mais abundantes em todas as amostras foram *Vibrionaceae* (principalmente *Vibrio* e *Photobacterium*), *Shingomonas* e *Ruegeria*. *Vibrios* foram mais abundantes em *F. gravida* no sítio costeiro sob influência do descarte de dragagens, Sebastião Gomes (A2), seguido pelo sítio costeiro Timbebas (B6) (Figura 25B).

2.6 NATUREZA DO SEDIMENTO E TAXAS DE SEDIMENTAÇÃO EM RECIFES E BANCOS DE RODOLITOS

Figura 26 : Sedimentos superficiais. Mineralogia dos sedimentos superficiais coletados nos recifes, agregados em valores médios semestrais. O sítio A6 (Timbebas – TIM2) está apresentado separadamente. Os valores dos sítios costeiros Pedra de Leste e Sebastião Gomes ("Inshore - A") e de todos os sítios recifais da Área B estão agregados, dada a similaridade.

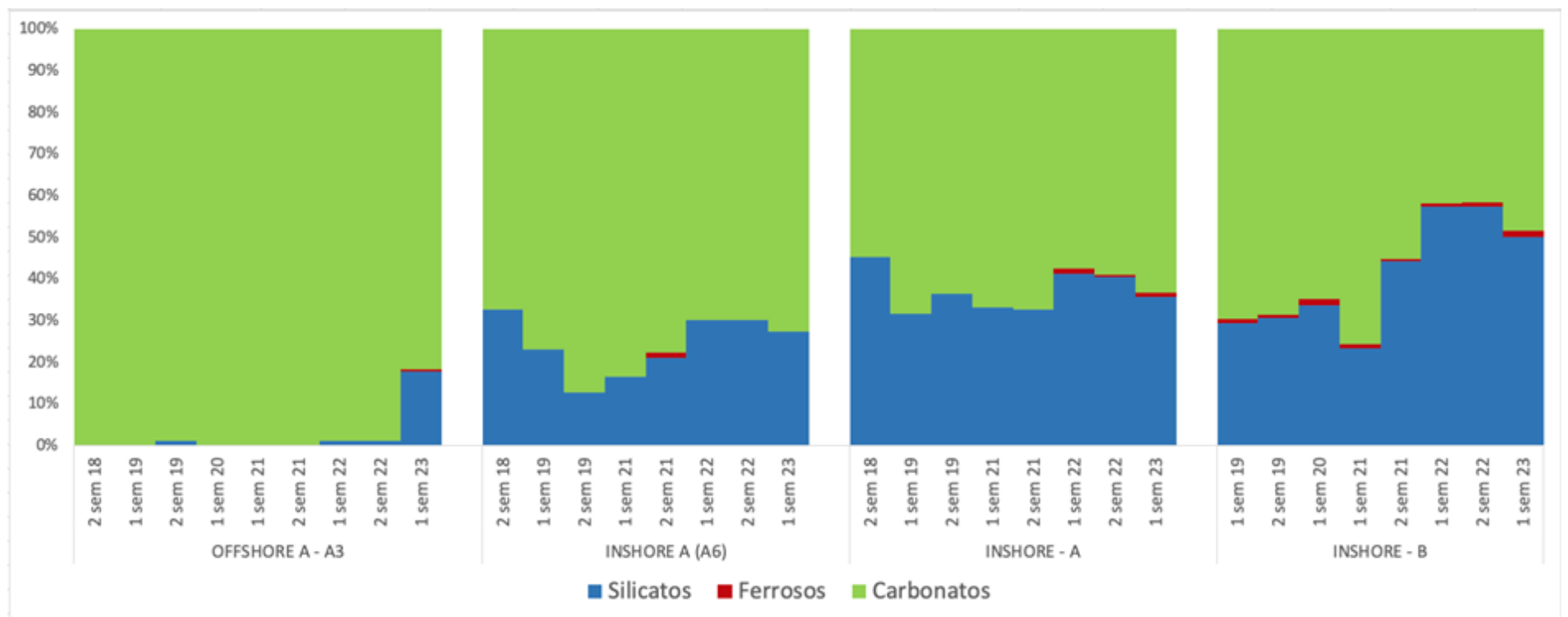


Figura 27 : Sedimentos superficiais. Mineralogia dos sedimentos superficiais coletados nos bancos de rodolitos, agregados em valores médios semestrais. A Área A está representada apenas pelo sítio A5, a Área B apenas pelo sítio, a Área C pelos sítios C2, C4 e C8 (médias) e a Área D pelos sítios D3, D6-8, D10-11 e D13 (médias). Obs.: Por razões operacionais e mau tempo durante a campanha no primeiro semestre de 2023 não foi possível obter amostras de sedimentos nas áreas C e D.

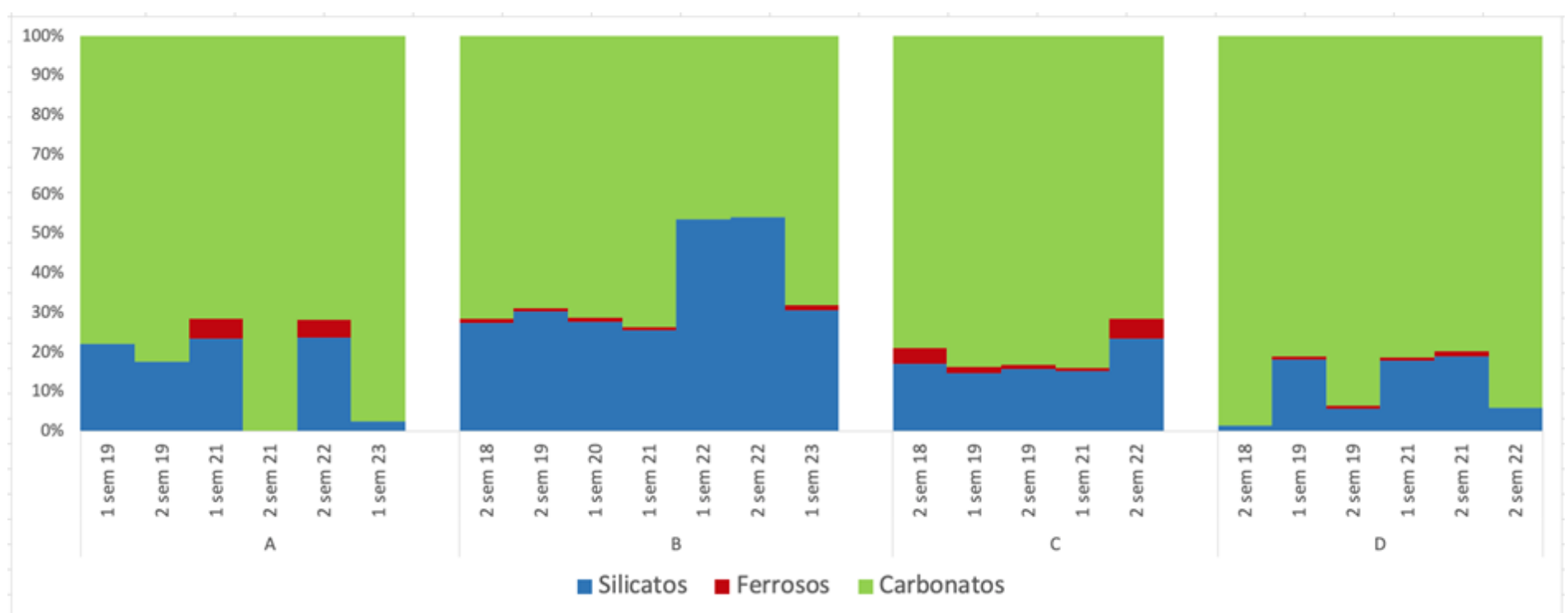


Tabela 3 : Sedimentos superficiais. Polimorfos nos sedimentos superficiais em todos os sítios de recifes (RE) e bancos de rodolitos (RO) (médias de todas as amostras, 2018-2023). Os sítios A4, na Ilha Santa Bárbara, bem como os sítios D2 e D5 sem rodolitos ou com rodolitos mortos e esparsos (veja Figura 2), destacados na base da tabela, não foram considerados nas séries temporais (Figura 31 e Figura 32), por serem singulares.

Sítio		N de Amostras	Gormanita	Greigita	Muscovita	Calcita	Aragonita	Calcita Mg	Caulinita
A1	RE	9	0	0,28	5,55	7,89	23,60	35,66	20,46
A2	RE	9	0	0,32	7,89	6,74	21,19	29,28	28,93
A3	RE	10	0	0,06	0,13	8,79	32,58	56,25	1,71
A6	RE	9	0	0	0	8,75	24,80	39,19	23,33
B4	RE	8	0,04	0,99	2,94	6,59	19,84	30,52	23,55
B6	RE	3	0	0,75	6,27	5,20	13,05	22,76	28,79
A5	RO	7	0	1,55	2,29	8,49	27,96	47,17	9,15
B1	RO	7	0,01	0,40	3,80	7,33	22,51	35,61	21,13
C2	RO	2	0	0	4,5	7,73	31,24	49,04	6,16
C4	RO	4	0,29	0,6	2,02	4,61	30,93	44,76	7,58
C8	RO	1	0	1,76	7,96	4,57	17,62	28,46	38,3
D3	RO	6	0	0,23	1,84	5,2	35,92	46,21	9,06
D6	RO	2	0	0	2,49	1,94	33,22	59	2,17
D7	RO	3	0,45	0,73	1,42	9,81	17,85	45,35	21,61
D8	RO	2	0	0	2,41	5,74	24,19	65,59	1,58
D10	RO	4	0,47	0,35	3,53	7,16	38,51	35,95	12,93
D11	RO	4	0	0	0,77	4,99	43,33	48,09	2,47
D13	RO	3	0	0,28	0,83	2,34	45,25	49,61	1,68
A4	AR	9	0	0,73	2,92	7,28	21,7	35,73	18,73
D2	RO	2	0	0	1,93	0,85	34,71	45,49	4,21
D5	RO	5	0	0,86	1,22	5,85	31,82	43,3	15,3

Figura 28 : Sedimentos superficiais. Polimorfos nos sedimentos superficiais coletados nos recifes, agregados em valores médios semestrais. O sítio A6 (Timbebas – TIM2) está apresentado separadamente (veja 2.1). Os valores dos sítios costeiros Pedra de Leste (A1) e Sebastião Gomes (A2) (rotulados como “Inshore - A”) e de todos os sítios recifais da Área B estão agregados para facilitar a visualização, o que é justificável dada a similaridade entre os sedimentos destes sítios (veja Tabela 3).

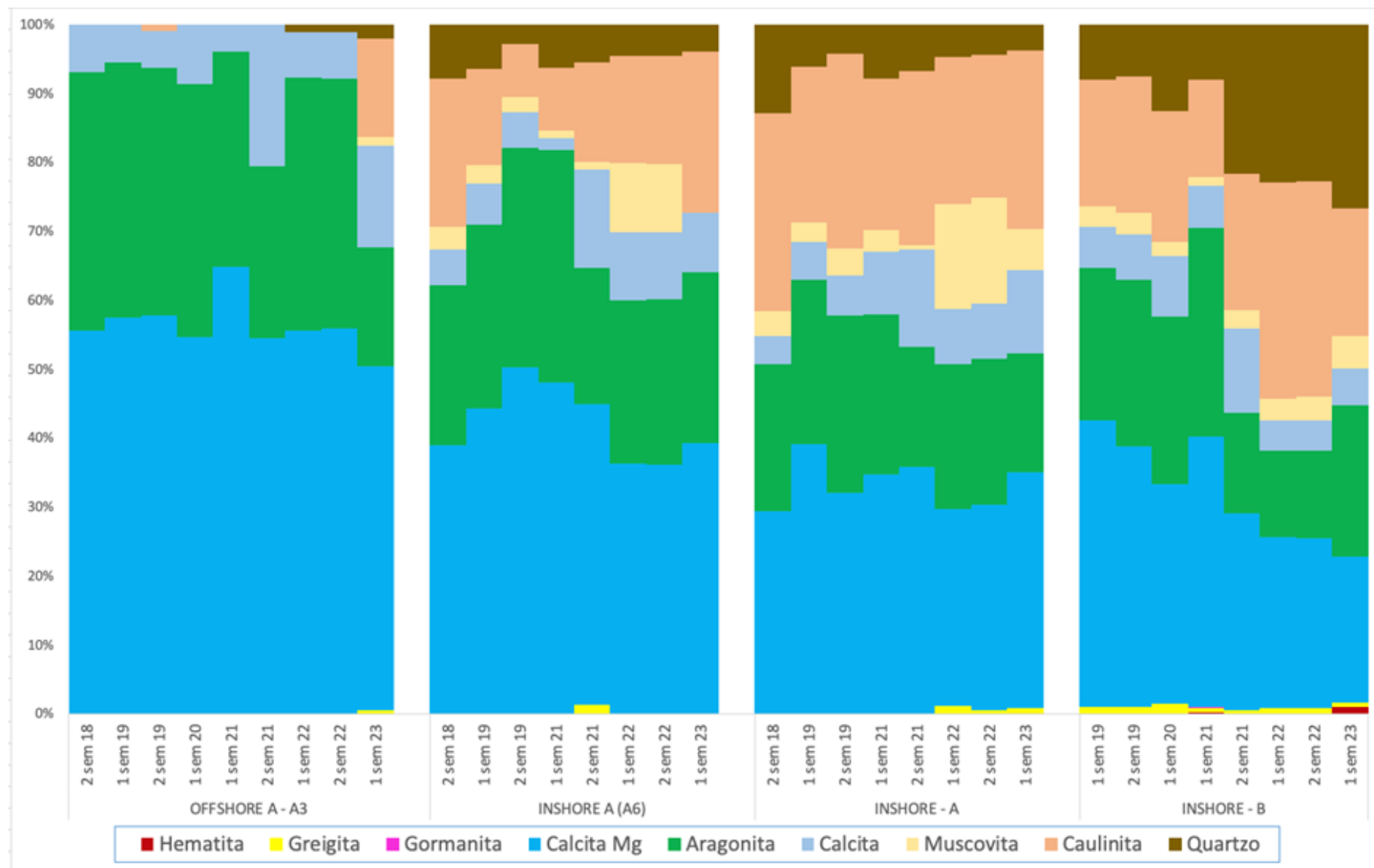
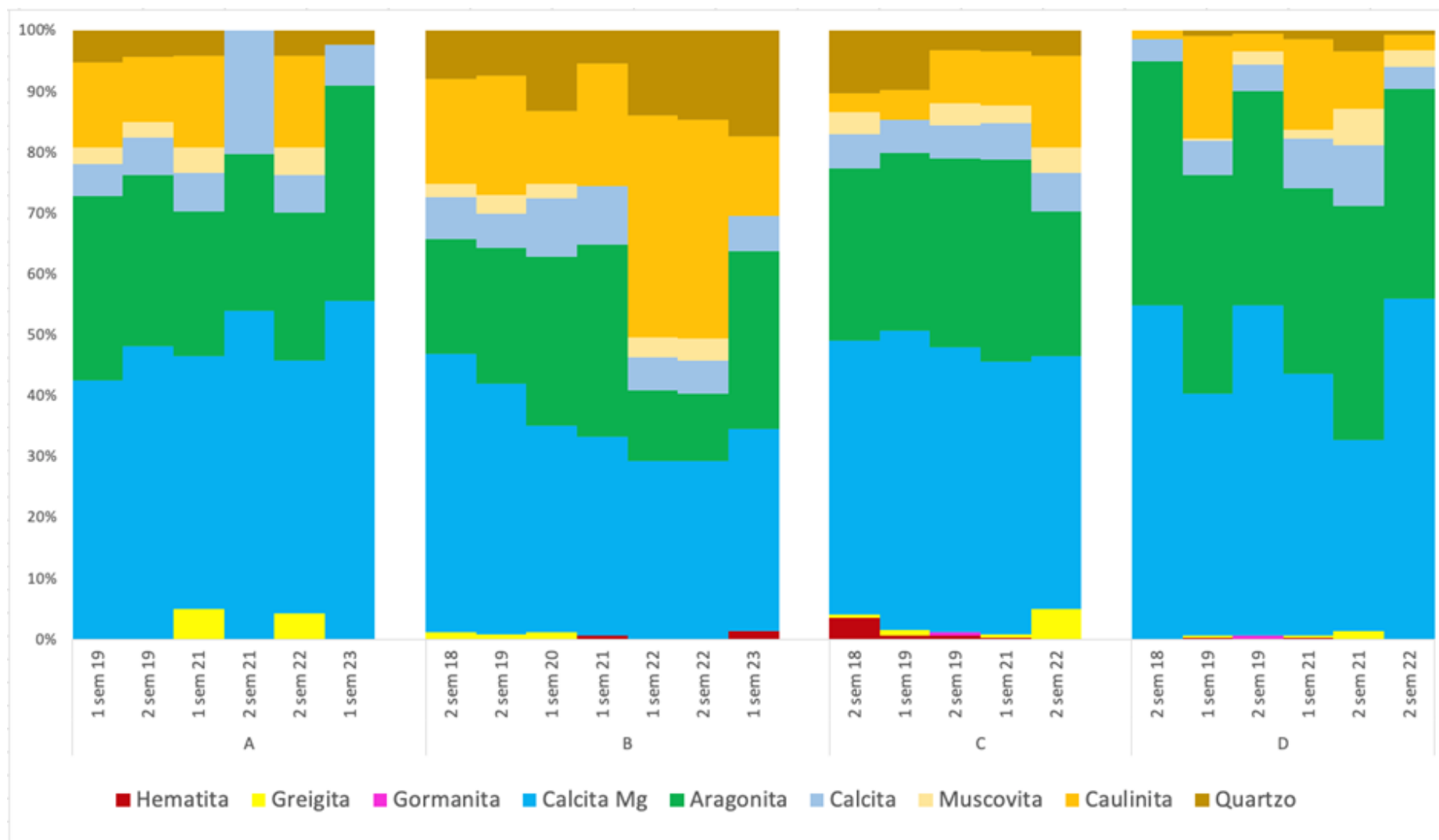


Figura 29 : Sedimentos superficiais. Polimorfos nos sedimentos superficiais coletados nos bancos de rodólitos, agregados em valores médios semestrais. A Área A está representada apenas pelo sítio A5, a Área B apenas pelo sítio B1, a Área C pelos sítios C2, C4 e C8 (médias) e a Área D pelos sítios D3, D6-8, D10-11 e D13 (médias). Obs.: Por razões operacionais e mau tempo durante a campanha no primeiro semestre de 2023 não foi possível obter amostras de sedimentos nas áreas C e D.



Ordenações (PCAs) apresentadas nos relatórios anteriores (RRDM, 2021; RRDM, 2022), baseadas em dados granulométricos e mineralógicos, permitiram discriminar os sítios da área A em relação aos da Área B, revelando também um agrupamento das amostras das áreas C e D. Essas análises não serão aqui repetidas. As amostras da Área A foram relacionadas principalmente à natureza biogênica do fundo (sedimentos oriundos de esqueletos carbonáticos) e à menor profundidade (REIS et al., 2016), além de estarem a maior distância da costa e da foz do Rio Doce. Os sítios A3 e A4, mais afastados da costa, se destacaram por apresentarem praticamente 100% de sedimentos biogênicos. Por outro lado, as amostras da Área B, mais próxima da costa e da foz do Rio Doce, tiveram presença marcante de sedimentos terrígenos, principalmente quartzo. A segregação das Áreas C e D está associada a uma maior deposição de sedimentos flúvio-terrígenos na porção sul da área de estudo, incluindo sedimentos ferrosos.

Em praticamente todas as estações amostrais em recifes e bancos de rodolitos os sedimentos superficiais foram majoritariamente compostos pela classe areia (50-95%; média ~75%), à exceção dos sítios D3 e D7 e de algumas estações (C4 e D11, dezembro de 2018; C4 e D7, fevereiro de 2019 e 2021) onde a classe cascalho predominou. A contribuição dos sedimentos mais finos (silte) foi menor nas demais estações (média de ~9%), exceto em fevereiro de 2021 no sítio C4. Cascalho teve contribuição média de ~16%. Os sítios com predominância de sedimentos mais grossos (C4, D7 e D11) foram os mais afastados da costa e mais próximos da quebra da plataforma. Nestes, a contribuição de sedimentos finos não variou de forma importante, nem mesmo em períodos de maior vazão do Rio Doce (COELHO, 2007). A inserção dos dados obtidos em 2023 corroborou os resultados anteriores de granulometria.

Quanto à mineralogia, os sedimentos da campanha de 2023 também corroboraram os resultados pretéritos, tendo sido compostos por três grandes grupos minerais: carbonatos (calcita Mg, calcita e aragonita), terrígenos ou silicilásticos (quartzo, caulinita e muscovita) e ferrosos (hematita e greigita). Os minerais mais representativos foram os carbonáticos (média ~69%), seguidos dos silicilásticos (30% em média) e de ferrosos (1% em média). A evolução temporal da participação dos grandes grupos minerais está apresentada separadamente para recifes (Figura 26) e bancos de rodolitos (Figura 27). As frações médias dos polimorfos nos sedimentos superficiais estão mostradas na Tabela 3, de maneira a fornecer um contraste espacial entre todas as estações. A evolução temporal está apresentada em detalhe para os recifes (Figura 28) e bancos de rodolitos (Figura 29).

Embora a detecção de sedimentos ferrosos não representenexo causal inequívoco com o rompimento, a presença destes sedimentos ao longo de todo o monitoramento (2018-2023) revelou a ampla abrangência das plumas flúvio-costeiras na plataforma continental. Por outro lado, a associação entre sedimentos ferrosos e o rompimento foi demonstrada através de assinaturas microestruturais e químicas das partículas minerais ferrosas contidas nos sedimentos, as quais foram similares entre as quatro áreas de estudo (inclusive nos sedimentos internos dos rodolitos) e aquelas oriundas do local onde ocorreu o rompimento da barragem (RRDM 2021 e 2022). Neste sentido, a detecção da contaminação por metais em esqueletos de corais e algas coralináceas formadoras de rodolitos,

apresentada em CARDOSO et al. (2021), confirmam a chegada de materiais associados ao rompimento nesses ecossistemas.

Figura 30 : Sedimentos superficiais. Mineralogia dos sedimentos superficiais coletados nos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas, agregados em valores médios semestrais.

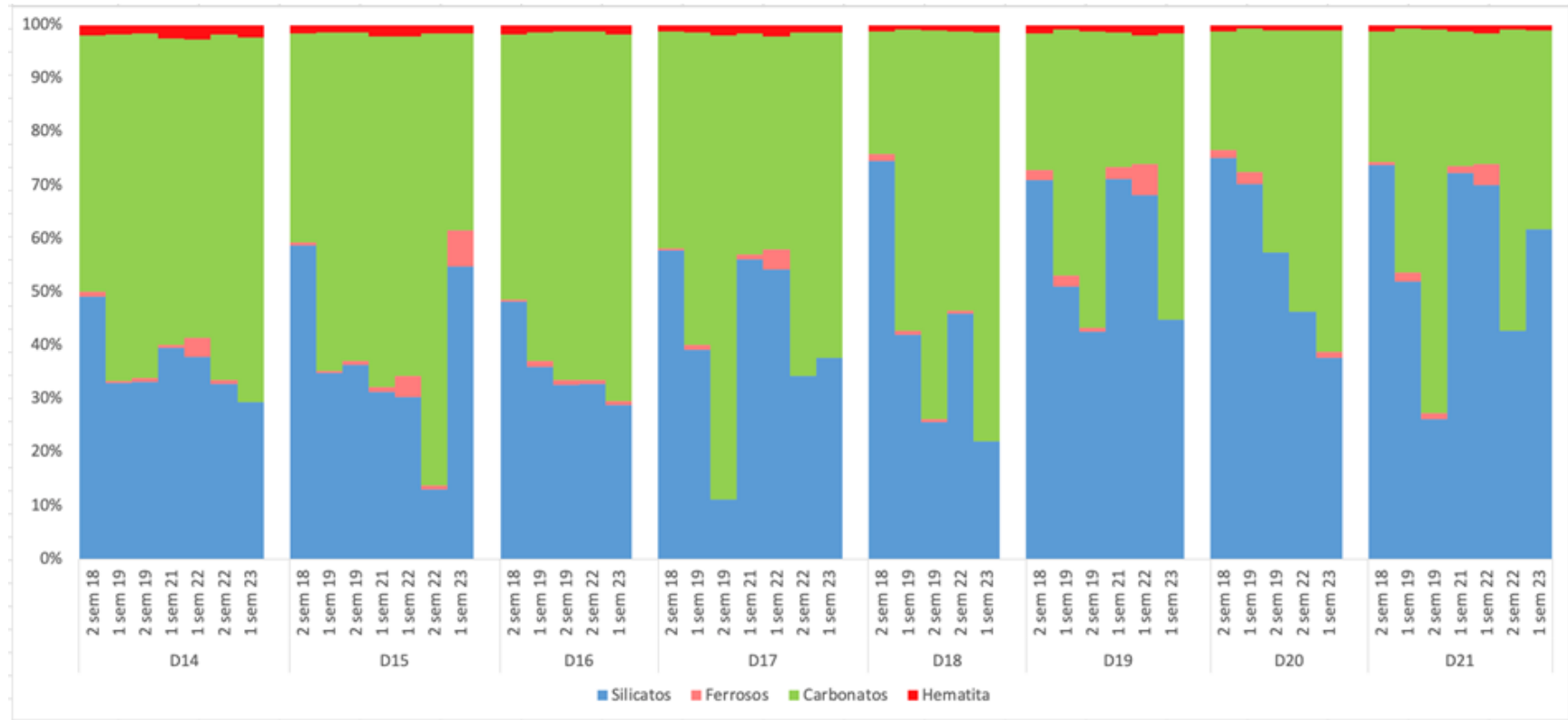


Figura 31 : Sedimentos superficiais. Polimorfos nos sedimentos superficiais coletados nos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas, agregados em valores médios semestrais.

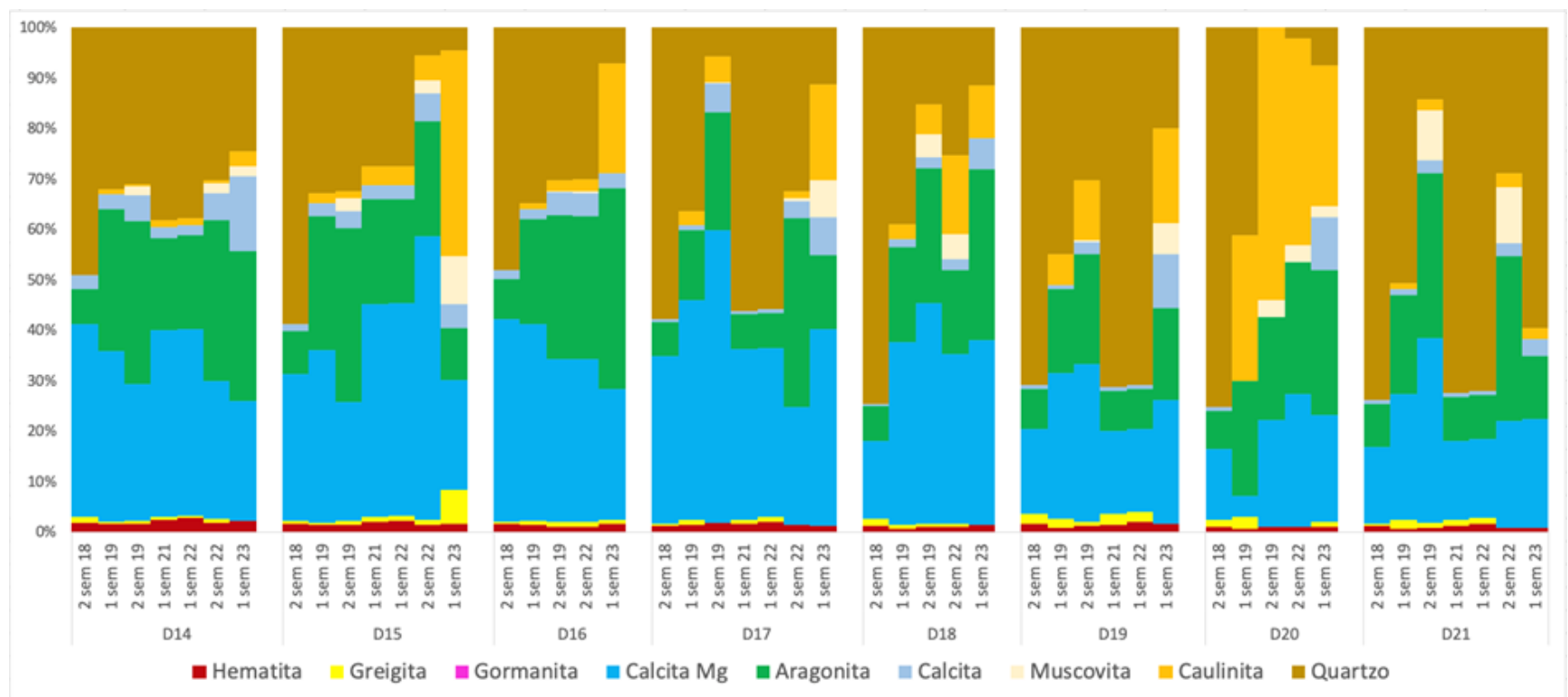
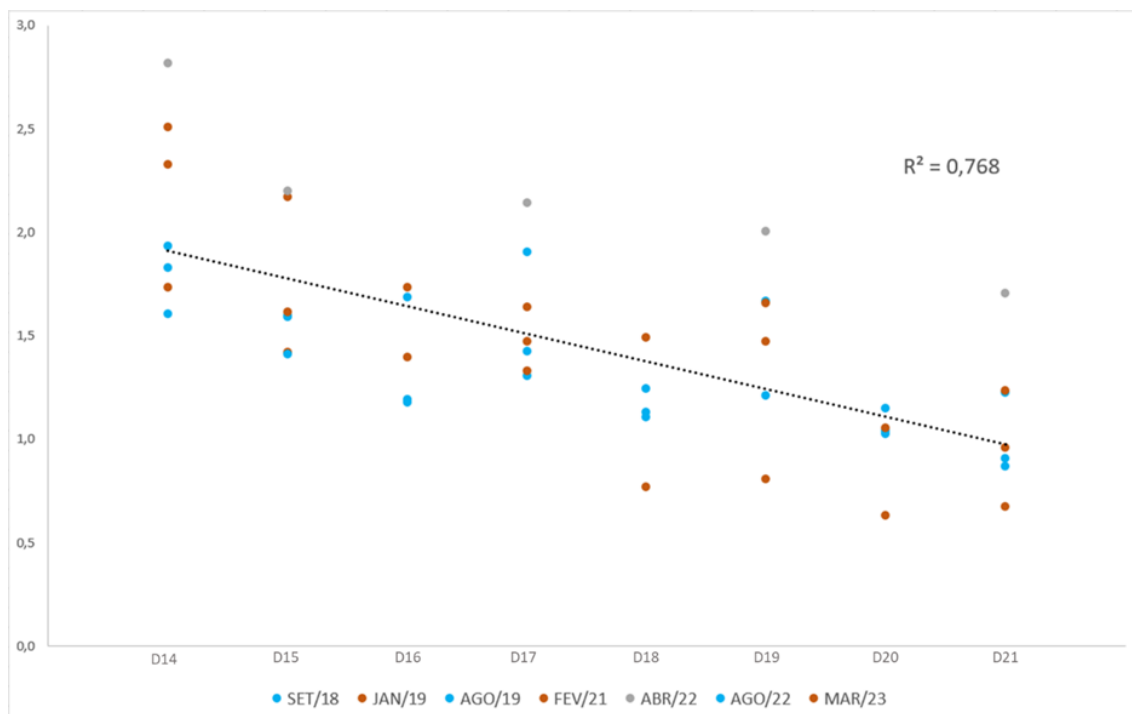


Tabela 4 : Sedimentos superficiais. Polimorfos nos sedimentos superficiais em todos os sítios de recifes adjacentes ao litoral (APA Costa das Algas) (médias de todas as amostras, 2018-2023).

Sítio	N de amostras	Gormanita	Greigita	Muscovita	Calcita	Aragonita	Calcita Mg	Caulinita
D14	8	0	0,56	0,79	5,03	23,73	32,03	1,11
D15	8	0	1,63	2,09	3,33	20,56	35,63	8,08
D16	6	0	1,77	1,74	3,42	22,29	32,42	10,89
D17	8	0	0,45	1,17	2,81	15,71	37,76	4,04
D18	6	0	0,53	2,59	3,24	19,04	34,64	8,28
D19	7	0	1,37	1,31	2,78	14,17	24,16	6,42
D20	6	0	0,88	2,31	3,52	19,67	19,43	25,31
D21	8	0	0,80	2,97	1,79	17,58	21,54	1,20

Figura 32: Sedimentos superficiais. Regressão linear entre o teor de hematita no sedimento superficial dos recifes costeiros e a os sítios dispostos em ordem da distância da foz do rio Doce (D14 ao D21) com dados coletados desde setembro de 2018 a março de 2023.



Nos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas a classe areia dominou em praticamente todos os sítios e campanhas (81% em média de 2018 a 2023), com exceção de D18 e D21, onde houve dominância de cascalho (setembro de 2018 e janeiro de 2019). Este tipo de sedimento foi o segundo mais encontrado nos demais sítios (14% em média), à exceção de janeiro de 2022, quando silte foi mais abundante que cascalho. De forma geral, sedimentos mais finos (silte) tiveram menor contribuição em todos os locais e campanhas (5% em média), mas chegaram a corresponder a ~40% da composição do sedimento de D14 (janeiro de 2022). Ordenações apresentadas em relatórios anteriores revelaram que a granulometria está associada à distância da foz do rio Doce (RRDM 2021, 2022).

Após a inserção dos dados obtidos em 2023, os polimorfos carbonáticos e siliciclásticos apresentaram contribuição média de 52,1 e 45,4%, respectivamente, nos recifes adjacentes ao litoral. Os minerais ferrosos hematita e greigita apresentaram contribuição média de 1,4 e 0,9%, respectivamente. A contribuição de minerais de origem terrígena caiu ~30% nas campanhas de maio e julho de 2019 (em comparação a setembro de 2018 e janeiro de 2019) e aumentou ~15% em fevereiro de 2021 e abril de 2022 (chuvosos). Em agosto de 2022, uma nova redução da fração terrígena foi observada. Já na campanha de março de 2023 foi registrado aumento de 6% na contribuição do sedimento carbonáticos, confirmando a flutuação da contribuição dos diferentes sedimentos em relação ao período de coleta.

A evolução temporal da participação dos grandes grupos minerais está apresentada na Figura 30. As frações médias dos polimorfos estão mostradas na Tabela 4, de maneira a fornecer um contraste espacial entre todas as estações. A evolução temporal nas frações dos polimorfos está apresentada na Figura 31, à exceção da hematita, cuja análise está apresentada na Figura 32.

Dentre as variações espaço-temporais observadas nos recifes costeiros da Área D, a hematita se destacou como possível assinatura da descarga sedimentar do rio Doce, pois apresentou atenuação linear ($R = 0,768$) com relação à distância da foz (do sítio D14 ao D21), ao longo de todo o monitoramento (2018-2023) (Figura 32). O aumento na concentração da hematita em função da proximidade da foz pode ser considerado uma evidência indireta do efeito do rompimento, ainda que não represente evidência direta da presença do rejeito na área de estudo. Por outro lado, outros sedimentos terrígenos não apresentaram aumento na concentração em função da proximidade da foz, como os silicatos, cuja concentração tendeu a ser maior nos sítios ao sul da Área D (veja RRDM 2022).

Conforme discutido anteriormente (e.g. RRDM, 2022), a maior fração de silicatos nos sítios mais ao sul, nos recifes adjacentes ao litoral, indica aportes de sedimentos terrígenos oriundos de drenagens locais (RRDM 2019 e 2020). Contudo, o possível efeito do rompimento na composição sedimentar desses recifes, indicado pela distribuição da hematita, é suportado por indicadores endereçados entre 2020 e 2022, tais como: 1) assinaturas microestruturais e químicas de partículas de óxidos de ferro nos sedimentos superficiais, similares àquelas oriundas da barragem; 2) detecção de partículas de óxidos de ferro sobre talos de macroalgas, com assinatura microestrutural e química similar aos sedimentos oriundos da barragem; 3) alterações celulares em macroalgas dos sítios costeiros da Área D e incorporação subcelular de íons de ferro nessas macroalgas (RRDM 2020, 2021, 2022).

Figura 33 : Sedimentos capturados em armadilhas. Mineralogia dos sedimentos coletados em armadilhas, agregados em valores médios semestrais. Os valores dos sítios costeiros Pedra de Leste (A1) e Sebastião Gomes (A2) (rotulados como "Inshore - A") e de todos os sítios recifais da Área B estão agregados para facilitar a visualização.

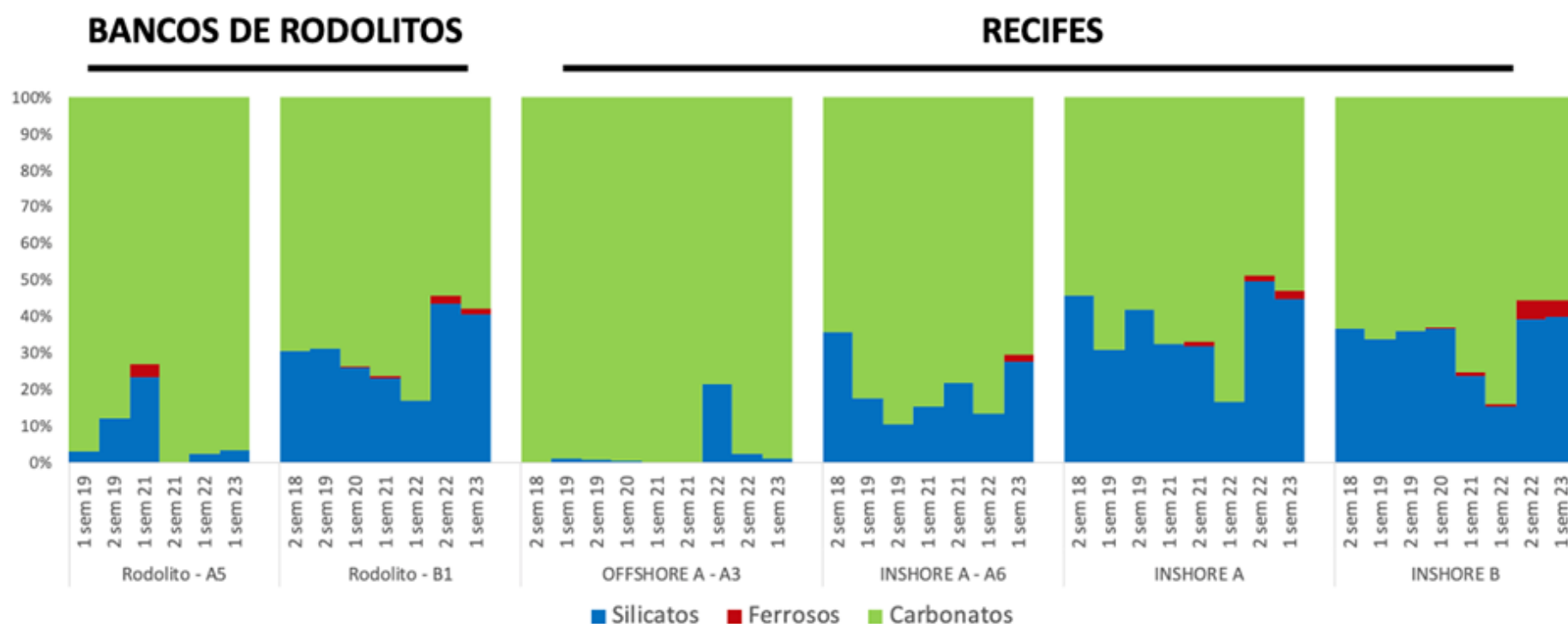
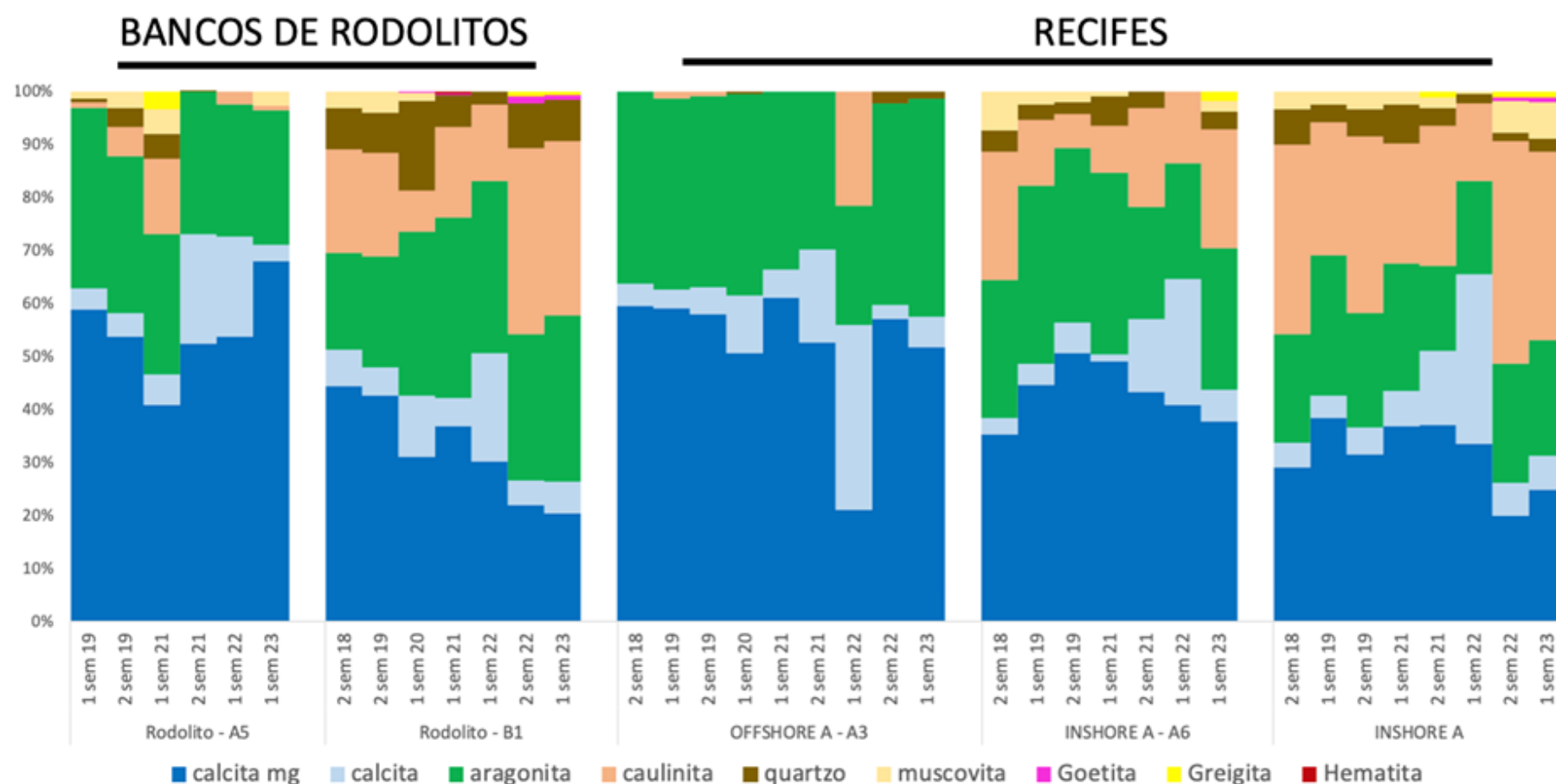


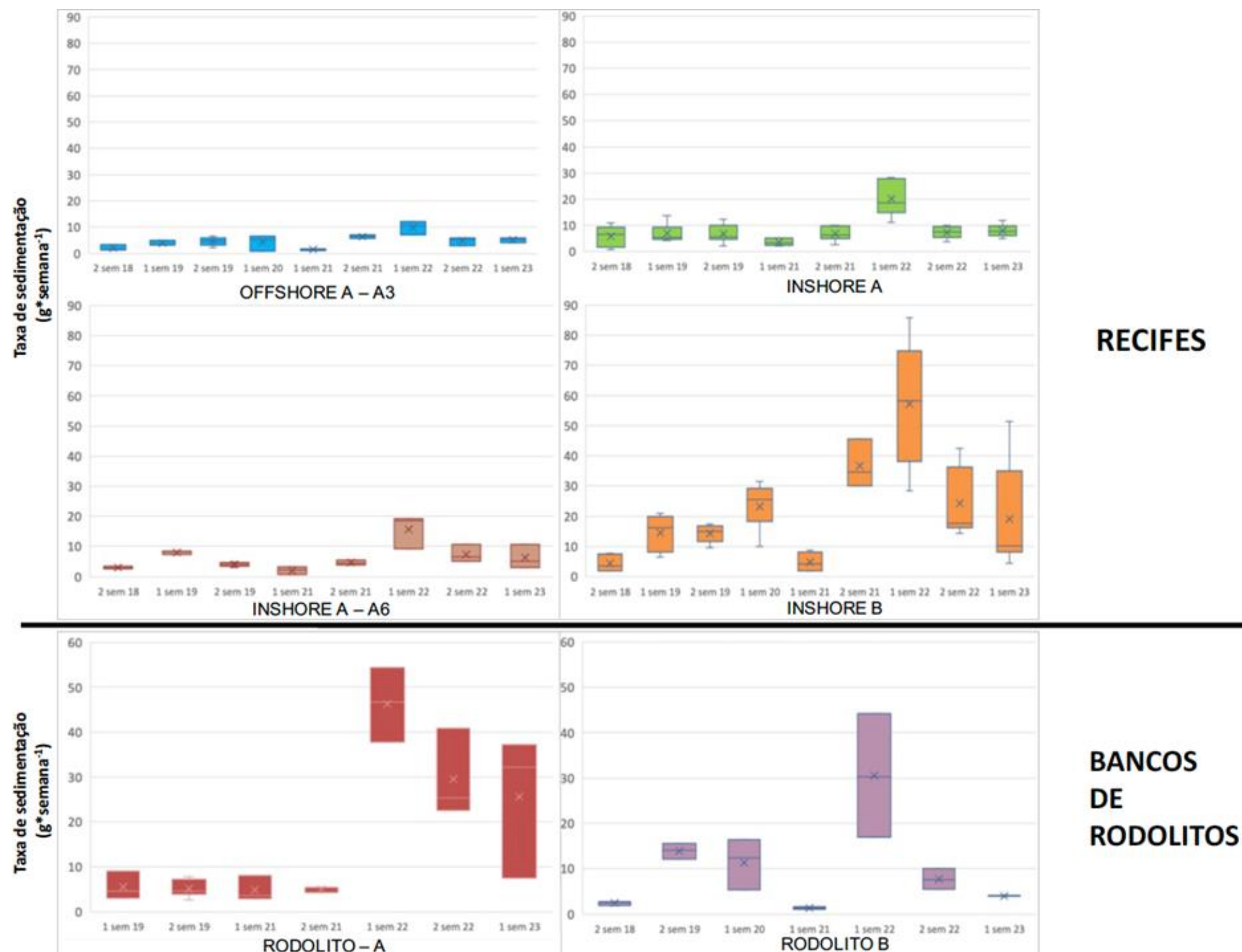
Figura 34 : Sedimentos capturados em armadilhas. Polimorfos nos sedimentos coletados em armadilhas, agregados em valores médios semestrais. Os valores dos sítios costeiros Pedra de Leste (A1) e Sebastião Gomes (A2) (rotulados como "Inshore - A") e de todos os sítios recifais da Área B estão agregados para facilitar a visualização.



Quanto às armadilhas com a função de capturar sedimentos, por sua vez, além de fornecerem informações sobre taxas de sedimentação, as armadilhas são úteis para a obtenção de sedimentos finos recentes. Nos relatórios anteriores (RRDM, 2021; RRDM, 2022), análises de componentes principais (PCAs) com dados mineralógicos e granulométricos evidenciaram um grupo formado pelas amostras da Área A e o outro pelas da Área B, o que foi corroborado pelos dados obtidos em 2023.

A classe granulométrica predominante nas armadilhas foi areia (~75% em média). A contribuição de sedimentos finos (silte) foi maior do que aquela dos sedimentos superficiais (8 e 19%, respectivamente). Sedimentos mais grossos (cascalho) foram menos abundantes (~6 % em média), com exceção de A5, com maior contribuição de cascalho (~15% em média) na maior parte das campanhas. Sedimentos de origem continental (e.g. silicatos) foram mais abundantes (20-30%, em média) nos recifes costeiros, seguidos dos sítios em bancos de rodolitos (A5 e B1; ~18%) e contrastando com o sítio A3, no Parcel dos Abrolhos, este último com mais de 80% de sedimentos carbonáticos em todas as campanhas (Figura 33). Ressalta-se o registro de minerais ferrosos goetita e hematita em recifes costeiros, mais abundantes na Área B (Figura 34).

Figura 35 : Sedimentos capturados em armadilhas. Taxas de sedimentação ($\text{g} \cdot \text{semana}^{-1}$) em armadilhas instaladas em recifes e bancos de rodolitos, agregadas por semestre. Valores dos sítios costeiros Pedra de Leste (A1) e Sebastião Gomes (A2) (rotulados como "Inshore - A") e de todos os sítios recifais da Área B agregados para facilitar a visualização.



As taxas de sedimentação nos recifes da Área B ($\text{g} \cdot \text{semana}^{-1}$) foram maiores do que na Área A (PERMANOVA, $p < 0,001$) (Figura 35). Dentre os sítios recifais da Área A as maiores taxas foram as de Sebastião Gomes e Pedra de Leste (A1 e A2) seguidas por A3 (Parcel dos Abrolhos) e A6 (Timbebas). Os sítios em bancos de rodolitos (e alguns sítios recifais, especialmente na Área B) apresentaram aumento nas taxas de deposição em 2022, indicando influência de forçantes meteocceanográficas, cujo efeito parece ter sido maior nos Recifes Esquecidos (Área B). Em 2023, o padrão se manteve nos sítios A1 e A2, A3 (Parcel dos Abrolhos), A6 (Timbebas) e nos Recifes Esquecidos (Área B). Já nos sítios de rodolitos, A5 continua recebendo grande aporte de sedimentos, incluindo aumento de sedimentos de origem terrígena, enquanto em B1 o aporte de sedimentos teve uma pequena diminuição, relacionada à redução de sedimentos terrígenos.

2.7 PRODUÇÃO DE CaCO_3 E COLONIZAÇÃO DE ORGANISMOS SÉSSEIS EM ESTRUTURAS ARTIFICIAIS

Figura 36: Assentamento, colonização e produção de CaCO_3 no período monitorado pelo PMBA/Fest. Cobertura relativa (%) das placas (CAUS) nos diferentes períodos de submersão (duração de um ano cada) após 2018.

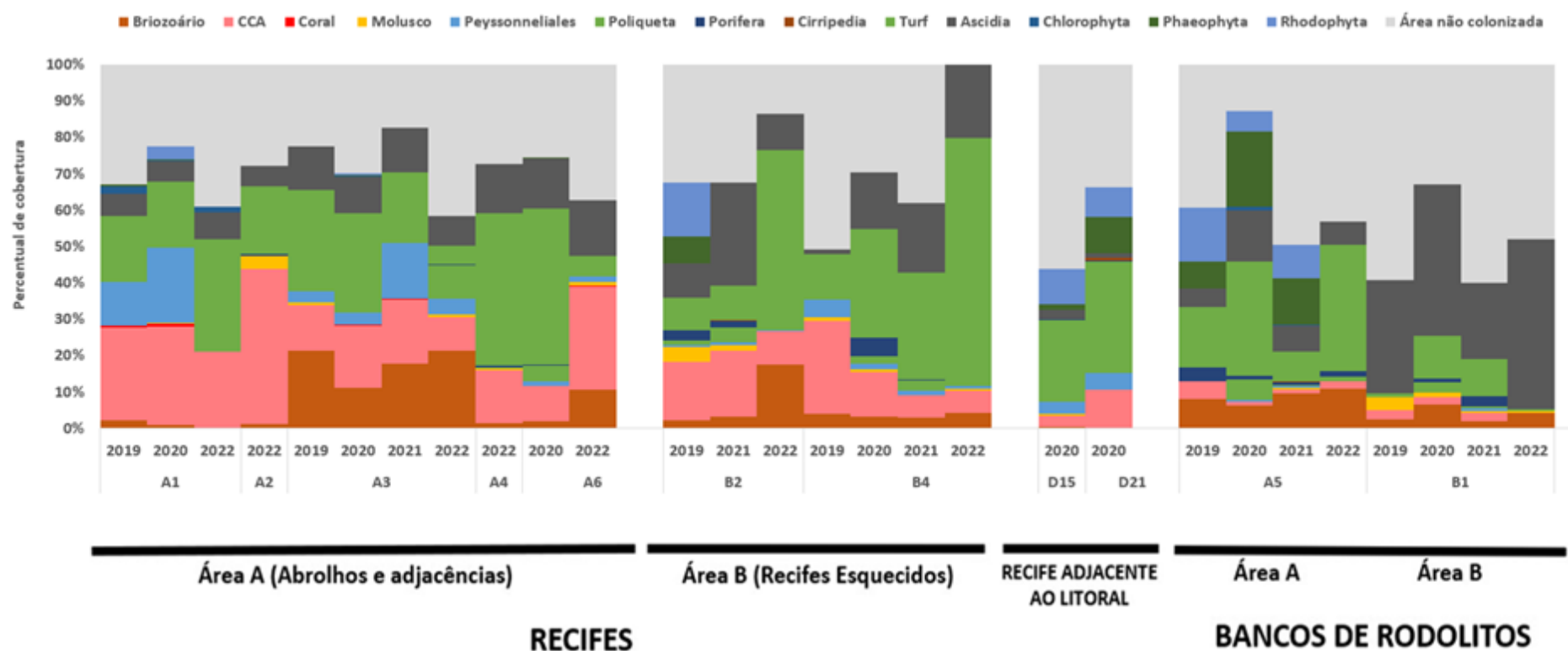
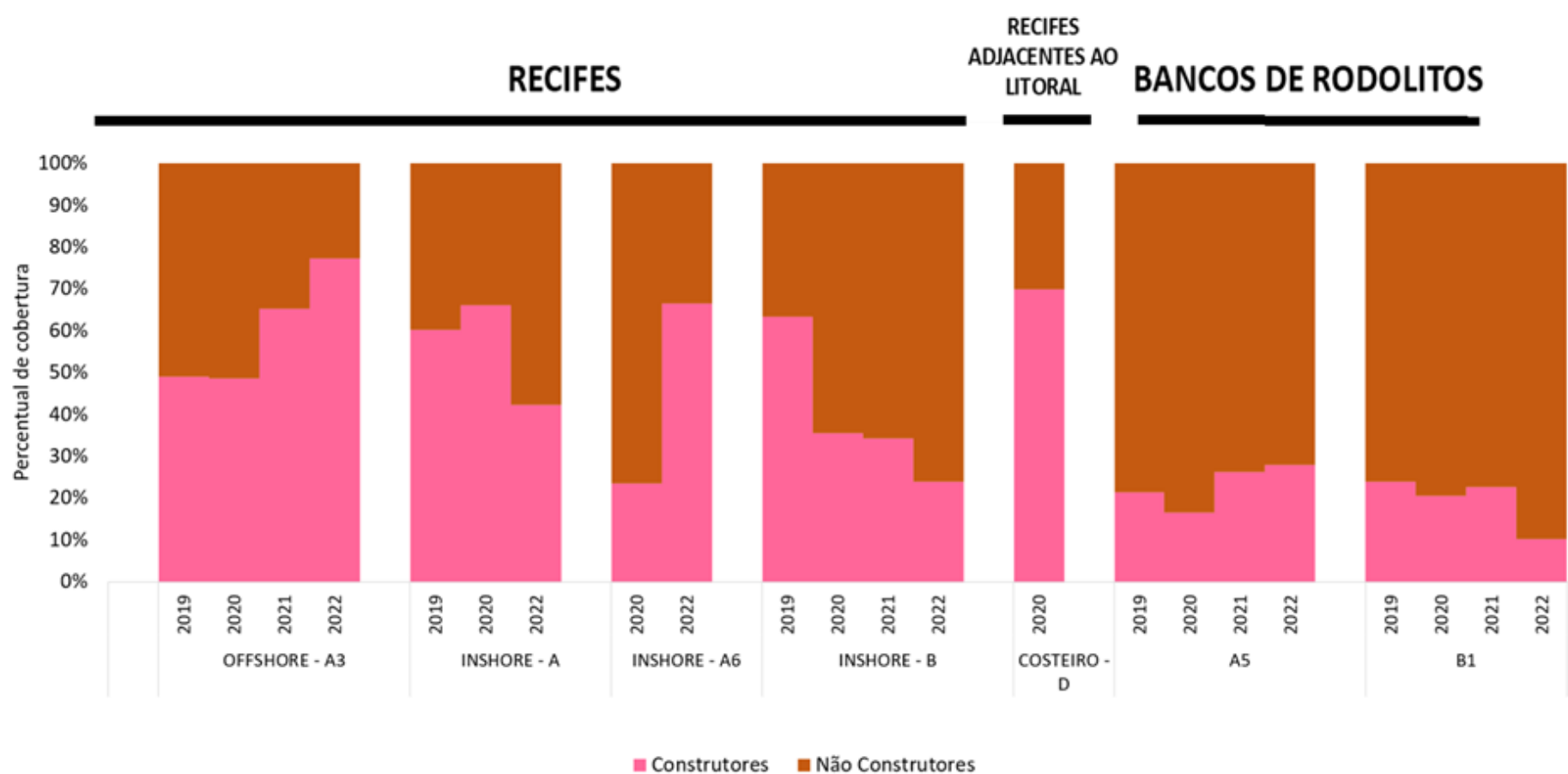
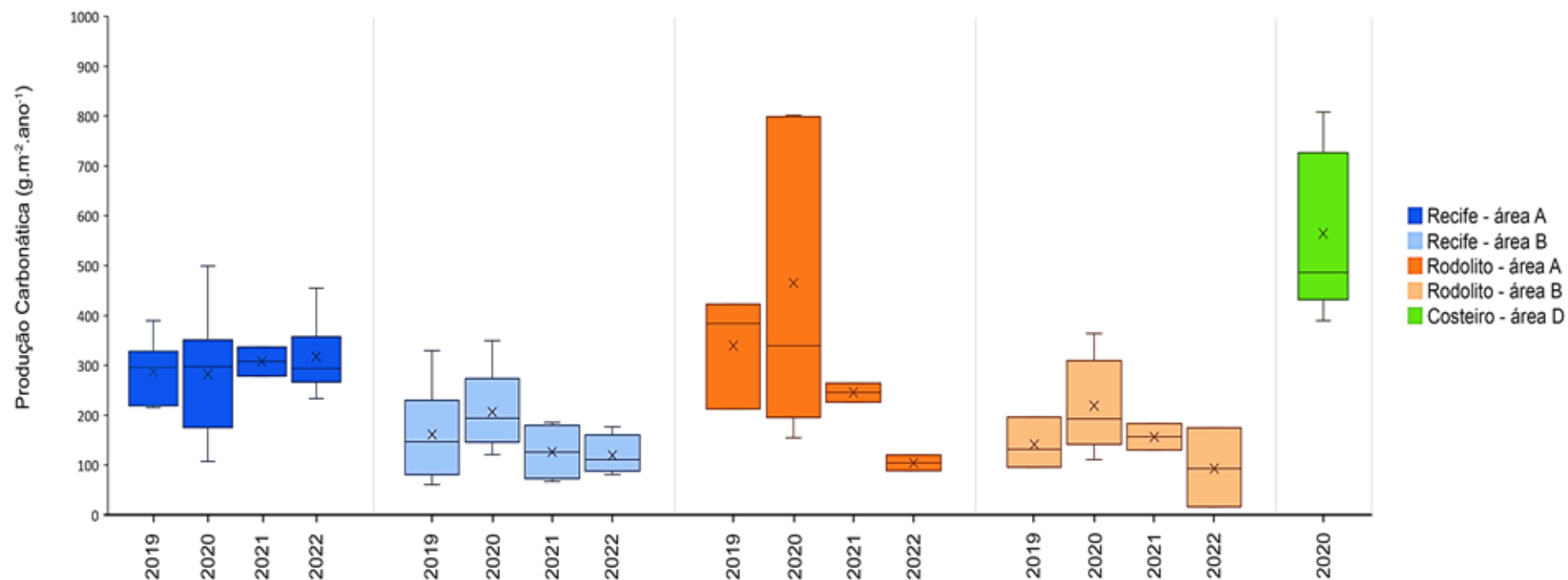


Figura 37: Assentamento, colonização e produção de CaCO_3 no período monitorado pelo PMBA/Fest. Percentual médio de cobertura dos organismos construtores e não construtores nos diferentes períodos de submersão (duração de um ano cada) após 2018.



Foram aqui incluídos dados de CAUs coletadas até o ano de 2022, cuja análise confirma os padrões de variação espaço-temporal na estrutura das comunidades assentadas e de produção de CaCO_3 nas placas recuperadas após 2018 (q.v., RRDM 2021; RRDM 2022). A composição da cobertura das CAUs recuperadas a partir de 2018 está apresentada na Figura 36. As CAUs correspondentes ao ciclo 2022-2023 estarão com 1 ano de colonização na próxima campanha (segundo semestre, 2023), motivo pelo qual não estão aqui consideradas. Esta nova série de dados será analisada e discutida no próximo relatório anual (2024). Com base nos dados mais recentes, nos recifes das áreas A e B, as placas foram mais colonizadas por CCA e turf, com contribuição importante de briozoários e ascídias. Já nos recifes da Área D foi observada importante contribuição de poliquetas, assim como de macroalgas e CCA. Em bancos de rodolitos, as placas da Área A apresentaram maior abundância de macroalgas e turf, com participação expressiva de briozoários e esponjas, ao passo que as da Área B tiveram participação mais importante de moluscos, cirripédios e ascídias. Organismos construtores e não construtores apresentaram maiores e menores coberturas nos sítios em recifes (A1, A3, B2 e B4) e bancos de rodolitos (A5 e B1), respectivamente (Figura 37). A razão entre construtores e não construtores também foi maior em recifes ($1,361 \pm 0,896$) do que em bancos de rodolitos ($0,274 \pm 0,086$).

Figura 38: Assentamento, colonização e produção de CaCO_3 no período monitorado pelo PMBA/Fest. Produção de massa carbonática ($\text{g.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$) em recifes, bancos de rodolitos e recifes adjacentes ao litoral nas 3 áreas de estudo (A - Abrolhos e adjacências, B – Recifes Esquecidos e D – Recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas) ao longo dos quatro ciclos de experimentação com placas de colonização (CAUs). As datas se referem ao ano da remoção, após um ano de submersão. As barras horizontais no interior das caixas representam as medianas.



Considerando as placas recuperadas a partir de 2018, a produção média de CaCO_3 na Área A (PARNAM Abrolhos e adjacências) e B (Recifes Esquecidos) foi de 307 ± 128 e $166 \pm 25 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, respectivamente. Nos bancos de rodolitos, a produção foi de 296 ± 130 e $165 \pm 35 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ nas áreas A e B, respectivamente. Nos recifes costeiros adjacentes ao litoral (Área D), cujas placas foram recuperadas em 2020 (submersas entre 2019-2020), a produção foi de $562 \pm 154 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$.

Nos quatro ciclos de experimentos de colonização realizados após a implementação do PMBA/Fest (2018-2019, 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022), os maiores valores absolutos de produção de massa carbonática ocorreram no período 2019-2020, nos bancos de rodolitos da Área A e nos recifes adjacentes ao litoral da Área D, seguidos pelos recifes da Área A, B e banco de rodolitos da Área B (Figura 38). Quanto à massa não-carbonática, os maiores valores também foram observados em 2019, nos recifes adjacentes ao litoral da Área D ($504 \pm 230 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$).

Figura 39: Contrastes com dados antecedentes ao rompimento. Contribuição relativa (%) dos grupos de organismos (esquerda) e de organismos construtores e não construtores em relação a massa total (direita), nos dois sítios com placas instaladas e removidas antes e depois do rompimento da barragem (Pedra de Leste – A1 e Parcel dos Abrolhos – A3). As placas ficaram submersas por um ano, entre 2012-2021. Os valores do eixo horizontal correspondem aos dois últimos dígitos do ano da remoção.

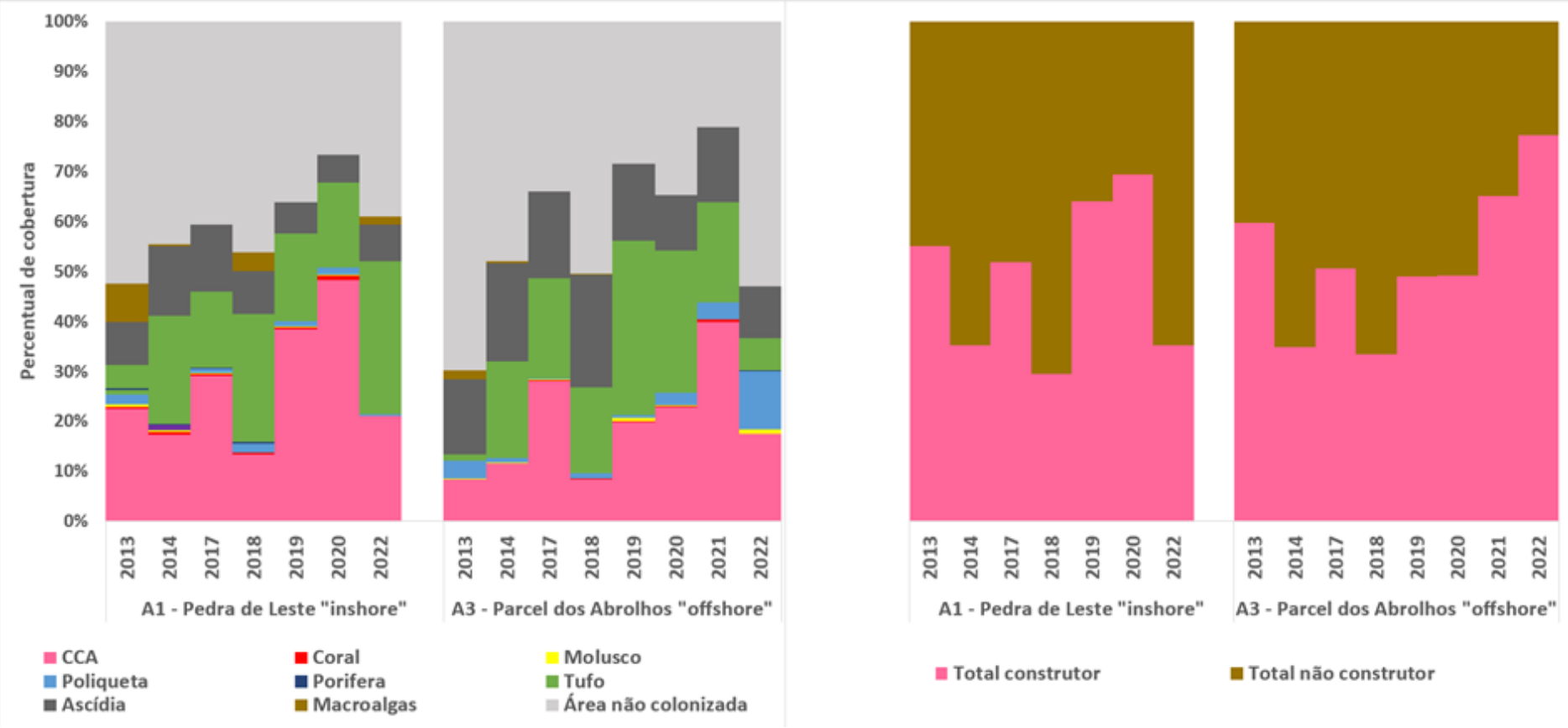


Figura 40 : Contrastes com dados antecedentes ao rompimento. Ordenação (nMDS) com os dados de cobertura das placas de colonização (CAUS) obtidos antes (2012-2013 e 2013-2014; dois ciclos) e após o rompimento da barragem (2016-2017, 2018-2019, 2019-2020, 2021-2022; 4 ciclos) nos sítios Pedra de Leste ("inshore") e Parcel dos Abrolhos – B3 ("offshore"), Área A (Abrolhos e adjacências). As correlações mostradas abrangem as variáveis mais influentes (Pearson $r > 0,7$).

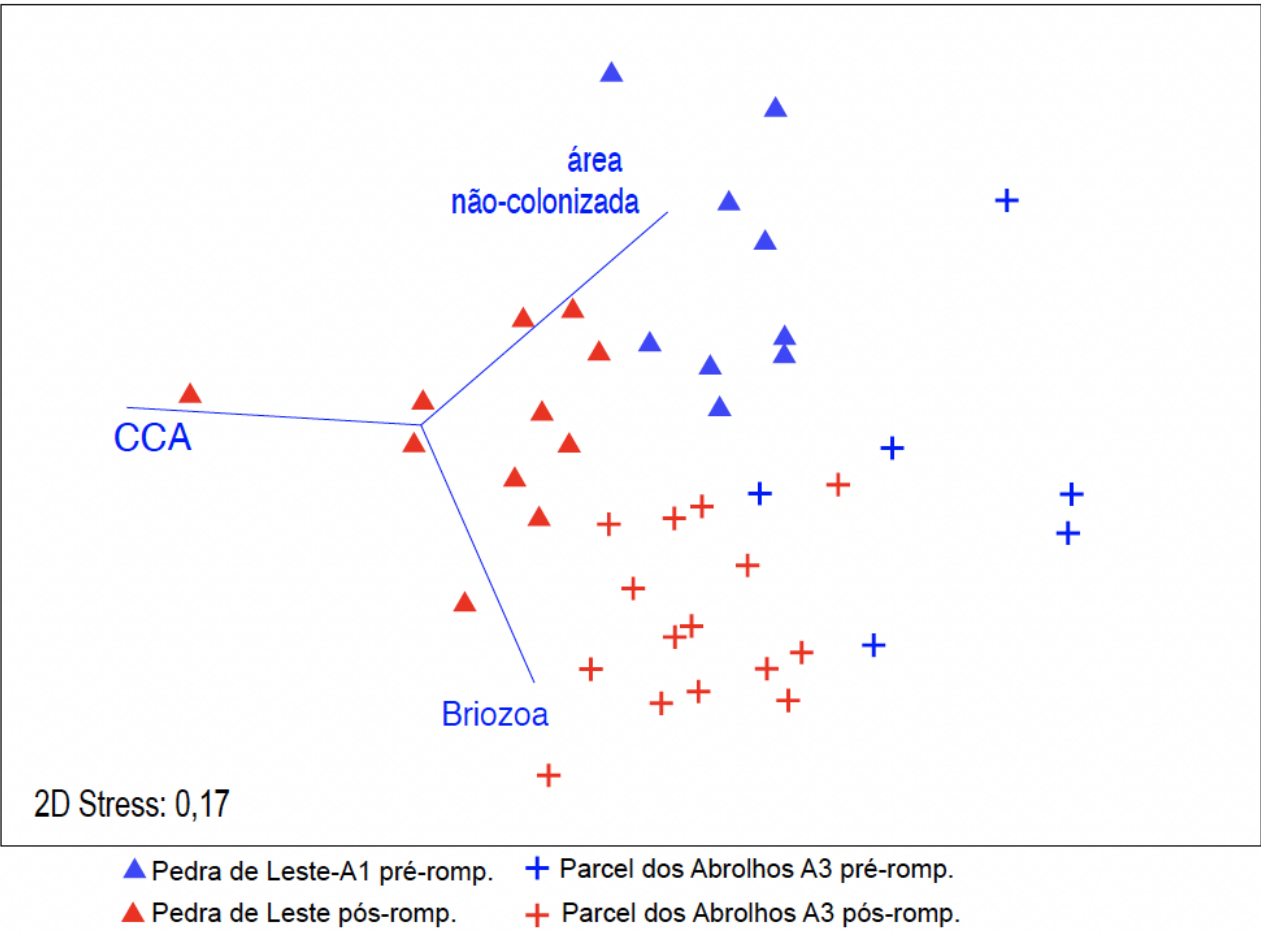


Tabela 5 : Contrastes com dados antecedentes ao rompimento. Sumário da PERMANOVA com dados de cobertura percentual das placas de colonização (CAUS) obtidos antes (2012-2013 e 2013-2014; dois ciclos) e após (2016-2017, 2018-2019, 2019-2020, 2021-2022; 4 ciclos) o rompimento da barragem, nos sítios Pedra de Leste e Parcel dos Abrolhos – B3, na Área A (Abrolhos e adjacências). Mesmos dados das Figura 39 e Figura 40.

	GL	SQ	Pseudo-F	P(perm)	P(MC)
1 - Sítio	1	3567,7	10.501	0,0004	0,0001
2 – Barragem (pré e pós rompimento)	1	10255	30.184	0,0001	0,0001
1*2	1	260,23	0,76599	0,4838	0,4834
Resíduos	37	12570			

Figura 41 : Contrastes com dados antecedentes ao rompimento. Massa calcária e não calcária nas placas (CAUS) antes (2012-2013 e 2013-2014; dois ciclos) e após o rompimento da barragem (2016-2017, 2018-2019, 2019-2020, 2021-2022; 4 ciclos) nos sítios Pedra de Leste (“inshore”) e Parcel dos Abrolhos – B3 (“offshore”), na Área A (Abrolhos e adjacências). Painei A: Ordenação (nMDS) com os dados de massa calcária e não calcária das placas (correlações de Pearson mostradas em azul abrangendo as duas variáveis). Os números ao lado dos símbolos indicam os anos das coletas das placas. Painei B: Massa calcária (g) nas placas. As linhas representam as medianas. Azul= pré-rompimento; Vermelho = pós-rompiment

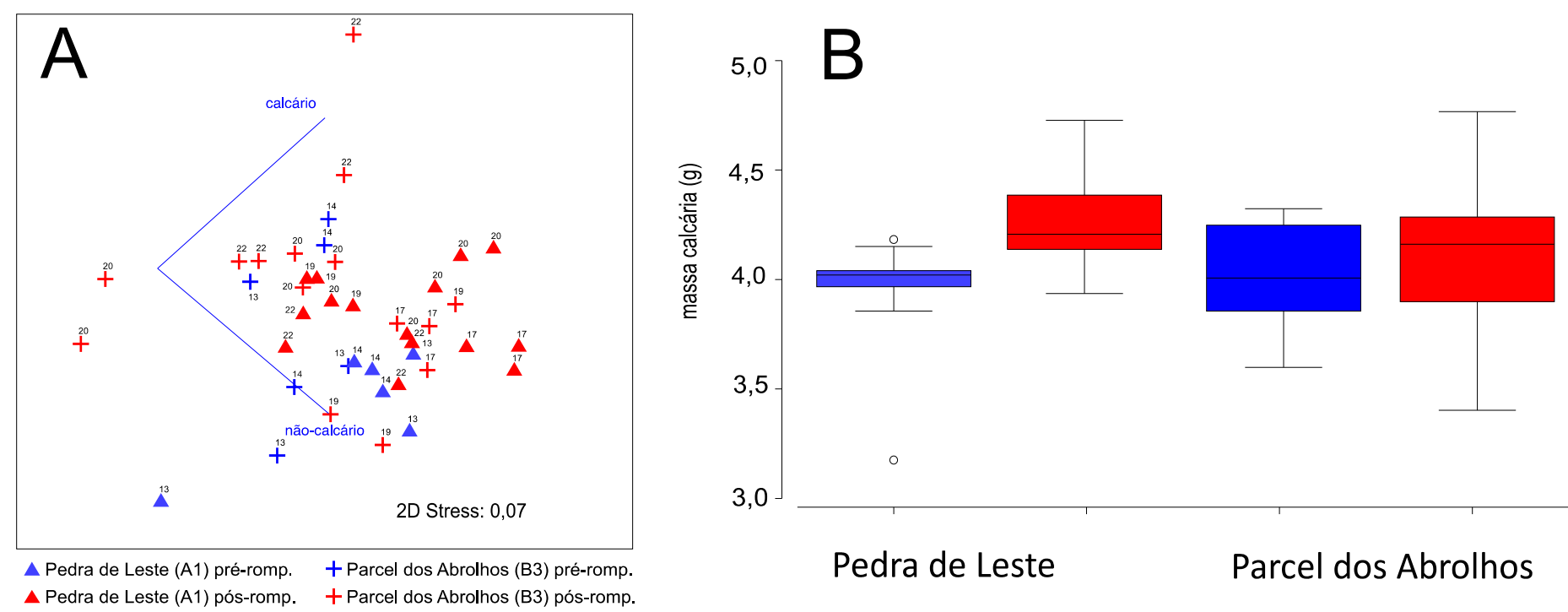


Tabela 6 : Contrastes com dados antecedentes ao rompimento. Resultado da PERMANOVA com dados de massa calcária das placas de colonização (CAUS) obtidos antes (2012-2013 e 2013-2014; dois ciclos) e após (2016-2017, 2018-2019, 2019-2020, 2021-2022; 4 ciclos) o rompimento da barragem, nos sítios Pedra de Leste (“inshore”) e Parcel dos Abrolhos – B3 (“offshore”), na Área A (Abrolhos e adjacências). Mesmos dados da B.

	GL	SQ	Pseudo-F	P(perm)	P(MC)
1 - Sítio	1	0,058	0,673	0,421	0,420
2 – Barragem (pré e pós rompimento)	1	0,474	5,531	0,023	0,025
1*2	1	0,135	1, 578	0,217	0,218
Resíduos	38	3,261			

Estão aqui apresentadas análises comparativas baseadas em CAUs instaladas antes (submersão entre 2012-2013 e 2013-2014; dois ciclos) e após o rompimento da barragem (2016-2017, 2018-2019, 2019-2020, 2021-2022; 4 ciclos), abrangendo os sítios A1 (Pedra de Leste) e A3 (Parcel dos Abrolhos). Os dados antecedentes ao PMBA/Fest foram obtidos no âmbito do programa PELD/CNPq e outros projetos. Um último conjunto de placas que se encontra submerso será resgatado no segundo semestre de 2023, de forma a compor a série temporal.

Os organismos registrados nas placas abrangem 10 grandes grupos taxonômicos, incluindo algas calcárias incrustantes (CCA – incluindo Peyssonaliales), briozoários, corais, moluscos, poliquetas, poríferos e crustáceos (considerados como organismos construtores), bem como tufos (=turf), ascídias e macroalgas (organismos não construtores, ou não calcificadores) (Figura 39). A cobertura total (média \pm desvio padrão) por organismos foi de $64,2 \pm 1,3$, sendo $31,5 \pm 0,5$ para construtores e $29,8 \pm 3,9$ para não construtores (Figura 40). Em A1 os construtores majoritários foram CCA ($26,9 \pm 3,7$), enquanto em A3 foram CCA ($16,7 \pm 4,7$) e briozoários ($13,8 \pm 5,4$). Em relação aos não-construtores, tanto em A1 quanto A3, predominaram tufos ($15,1 \pm 6,3$ e $17,7 \pm 9,3$, respectivamente) e ascídias ($9,1 \pm 3,4$ e $13,6 \pm 2,9$ respectivamente).

A ordenação (nMDS) com dados de cobertura (Figura 40), acompanhada por PERMANOVAs (Tabela 5), discriminou significativamente os sítios e o efeito da barragem, sem destacar interação. De maneira geral, houve diminuição na área não colonizada e aumento na colonização por CCA após o rompimento, nos dois sítios.

Entre 2012 e 2022 a produção média de CaCO_3 e de massa não calcária foi de 342 ± 70 e $51 \pm 26 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, respectivamente. Uma segunda ordenação (nMDS) utilizando os valores de massa calcária e não calcária mostrou aumento na massa calcária após o rompimento (Figura 41A), principalmente no sítio costeiro Pedra de Leste (A1) (Figura 41B), a qual esteve associada às maiores coberturas por CCA após o rompimento (veja Figura 40). Uma PERMANOVA com as massas calcárias das placas antes e depois do rompimento (sítios considerados como fatores fixos) mostra efeito significativo do evento (Tabela 6).

Os resultados revelam uma associação entre o rompimento da barragem e alterações em processos de colonização dos recifes na Área A, os quais tendem a se propagar no nível do ecossistema em escalas temporais mais dilatadas. O aumento na massa calcária, que poderia indicar intensificação no crescimento recifal como um todo, deve ser interpretado cautelosamente e em conjunto com os demais resultados. Por exemplo, a cobertura de corais longevos e de crescimento lento, endêmicos (veja 2.1), foi reduzida após o rompimento (grupo funcional MUSSISMILLIAS), mas foi acompanhada de aumento na cobertura de corais de crescimento rápido e vida curta (grupo funcional AGARICIAS), associados aos estágios iniciais de sucessão ecológica. Assim, o aumento na massa calcária nas placas de colonização, que ficam submersas por apenas um ano, foi associado à cobertura de CCA, que são organismos de sucessão primária. A nova série temporal a ser analisada, correspondente ao período 2022-2023, contribuirá para a melhor compreensão dos efeitos do rompimento.

3 REFERÊNCIAS

- AMBARSARI, I., et al. Fluctuations in algal chlorophyll and carotenoid pigments during solar bleaching in the coral *Goniastrea aspera* at Phuket, Thailand. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, vol. 159, p. 303-307.
- BOLGER, A.M.; LOHSE, M.; USADEL, B. Trimmomatic: A flexible trimmer for Illumina sequence data. *Bioinformatics*, v. 30, n. 15, p. 2114-2120, 2014.
- BRASILEIRO, P.S. et al. Macroalgal composition and community structure of the largest rhodolith beds in the world. *Marine Biodiversity*, v. 46, n. 2, p. 407-420, 2016.
- CARDOSO, G.O.; FALSARELLA, L.N.; CHIROQUE-SOLANO, P.M. et al. Coral growth bands recorded trace elements associated with the Fundão dam collapse. *Science of the Total Environment*, v. 807, p. 150880, 2022.
- COELHO, A.L.N. Alterações hidrogeomorfológicas no médio-baixo rio Doce/ES. 2007. 227 (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- DUARTE, G.A.S., et al. Heat waves are a major threat to turbid coral reefs in Brazil. *Frontiers in Marine Science* 7: 179, 2020
- FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/Fest. RT-43. Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 193 pag. 2023.
- GOLDER. Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão, Avaliação do estado de conservação dos bancos de macroalgas e rodolitos adjacentes à Foz do rio Doce. Submetido à Samarco Mineração S/A. 2016.
- ILUZ, D.; DUBINSKY, Z. Coral photobiology: New light on old views. *Zoology*, 2015, vol. 118, no 2, p. 71-78.
- KLEPPEL, G.S.; DODGE, R.E.; REESE, C.J. Changes in pigmentation associated with the bleaching of stony corals. *Limnology and Oceanography*, 1989, vol. 34, no 7, p. 1331-1335.
- R CORE DEVELOPMENT TEAM (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>
- REIS, V. M.; KAREZ, C. S.; MARIATH, R.; DE MORAES, F. C.; CARVALHO, R. T.; BRASILEIRO, P. S.; BAHIA, R. G.; LOTUFO, T. M. C.; RAMALHO, L. V.; MOURA, R. L. et al. Carbonate production by benthic communities on shallow coralgal reefs of Abrolhos Bank, Brazil. *Plos One*, 11, n. 4, p. 21, 2016.
- RIBEIRO, F.V. et al. Long-term effects of competition and environmental drivers on the growth of the endangered coral *Mussismilia braziliensis* (Verrill, 1867). *PeerJ*, 6:e5419, 2018.
- RIBEIRO, F.V. et al. Benthic cyanobacterial diversity and antagonistic interactions in Abrolhos Bank: Allelopathy, susceptibility to herbivory, and toxicity. *Frontiers in Marine Science*, p. 1887, 2022.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2020.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2021.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2022.

SCHERNER, F.; HORTA, P. A.; DE OLIVEIRA, E. C.; SIMONASSI, J. C. *et al.* Coastal urbanization leads to remarkable seaweed species loss and community shifts along the SW Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 76, n. 1-2, p. 106-115, 2013.

TEIXEIRA, C.; LEITÃO, R.; RIBEIRO, F.V.; MORAES, F. *et al.* Sustained mass coral bleaching (2016-2017) in Brazilian turbid-zone reefs: taxonomic, cross-shelf and habitat-related trends. *Coral Reefs*, 38, p. 801-813, 2019.

TEIXEIRA, C. D.; CHIROQUE-SOLANO, P. M.; RIBEIRO, F.V.; CARLOS-JÚNIOR, L.A. *et al.* Decadal (2006-2018) dynamics of Southwestern Atlantic's largest turbid zone reefs. *PLoS ONE*, v. 16, e0247111. 2021.

VENN, Alexander A., *et al.* The impact of coral bleaching on the pigment profile of the symbiotic alga, *Symbiodinium*. *Plant, Cell & Environment*, 2006, vol. 29, no 12, p. 2133-2142.