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

Material Suplementar Ambiente Costeiro

Tema: Restinga

RT-55/OUT26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2026

EQUIPE TÉCNICA

Diolina Moura Silva (coordenadora)

Adriano Nunes Nesi

Jairo Pinto de Oliveira

Oberdan José Pereira

Servio Tulio Alves Cassini

Silvia Tamie Matsumoto

Valquíria Ferreira Dutra

Wagner Luiz Araújo

Auxiliadora Oliveira Martins

Francielen Barroso Aragão

Larissa Bernardino Moro

Mariela Mattos da Silva

Romário de Oliveira Silva Junior

Sabrina Garcia Broetto

Bruna Silva Corrêa

Dayvid Rodrigues Couto

Gislane Chaves Oliveira

João Paulo Fernandes Zorzanelli

Juliana da Silva Penha

Mariana Machado Rocha

Rebeca Matos Groner

Vinícius Henrique de Carvalho

Leo Gasparini de Oliveira

Davi Valim Bastos

Emanuel Ferreira de Souza

Gabriel Rosa de Sousa

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 4

2 METODOLOGIA 4

2.1 COLETA 5

2.1.1 Análises de contaminantes no sedimento, material depositado sobre as folhas (“Spray”) e tecidos vegetais 5

2.1.2 Inventário Florístico e da Estrutura, e Fenologia da vegetação 6

2.1.3 Monitoramento ecofisiológico da vegetação de Restinga 9

2.2 ANÁLISE 10

2.2.1 Contaminação do sedimento, do material depositado sobre as folhas (“Spray”) e dos tecidos vegetais, e granulometria 10

2.2.2 Inventário Florístico, estrutural e fenológico da vegetação 11

2.2.3 Análises bioquímicas e alterações celulares da Restinga monitorada 13

2.2.4 Análise de dados e determinação da Situação de Risco e Alerta de Perigo 14

2.2.5 Estratégias para divulgação científica e popularização da ciência para conservação da Restinga 16

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 16

2.4 ALTERAÇÕES NA MALHA, FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADAS EM OUTUBRO DE 2024: CONSEQUÊNCIAS PARA AS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES 18

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 20

3.1 VITALIDADE DA VEGETAÇÃO 21

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 45

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 48

6 REFERÊNCIAS 48

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e a frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest-UFES) passaram por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para 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 Análises de contaminantes no sedimento, material depositado sobre as folhas (“Spray”) e tecidos vegetais

Coleta de sedimentos: as amostras de sedimentos foram coletadas semestralmente, respeitando a periodicidade estabelecida pelo monitoramento (período seco/chuvoso). A abrangência incluiu as três formações vegetais (herbácea, arbustiva e arbórea) amostradas em cada estação do Tema Restinga. Para o novo escopo e malha amostral do tema, vigente a partir de outubro de 2024, foram excluídas as análises da formação arbórea, bem como da estação de Barra Nova (E4). Considerando a inserção do ecossistema Restinga no Ambiente Costeiro, a área monitorada seguiu a divisão reconhecida pelo Tema Praias e adotada por todos os temas deste ambiente. Assim, o litoral compreendido entre os setores dos terraços de abrasão e planície costeira do rio Doce foi compartimentalizado em três compartimentos, A, B, e C, sendo o compartimento B ainda subdividido em B e B’, em vista de suas diferenças de amplitude topográfica. Para o Tema Restinga atualmente, as estações monitoradas se localizam no Compartimento C, com estações amostrais entre a Área de Proteção Ambiental de Conceição da Barra, Aldeia do Coco e Degredo (E1, E3 e E10); no Compartimento B’, abrangendo as estações amostrais de Cacimbas (E6) e Reserva Biológica de Comboios (E7); e no Compartimento A, que se restringe a estação amostral E9, em Mar Azul, Aracruz. O critério de escolha das coletas de sedimento incluiu 10 pontos estabelecidos próximos às plantas monitoradas pelos estudos ecofisiológicos. Foram coletadas amostras de 0-20 cm de profundidade com auxílio de pás de plástico, suficientes para análise em triplicata. As amostras foram secas em estufa a 60°C por 72 h ou até peso constante.

Análises do material depositado sobre as folhas (“Spray”): as coletas foram realizadas nas estações amostrais definidas em função do posicionamento na compartimentação e morfodinâmica de região costeira do Espírito Santo. Folhas das espécies selecionadas nestas estações e nas formações herbácea e arbustiva, a partir de outubro de 2024, foram lavadas com 50 mL de água ultrapura e o líquido recolhido em tubos Falcon 50 mL, com adição de HNO_3 a 2% (v/v) para conservação. As amostras foram mantidas sob refrigeração até o envio para as análises químicas (Laboratório de Espectrometria Atômica/UFES).

Coleta de estruturas vegetais: espécies-chave selecionadas nas estações amostrais foram analisadas, com tratamentos compostos por cinco indivíduos. As espécies escolhidas estão entre as com maior valor de importância, elencadas previamente pelos estudos fitossociológicos e que melhor representam as comunidades de cada estação. Os órgãos coletados de um mesmo indivíduo foram agrupados para obtenção de material suficiente para análise em triplicata. As amostras vegetais coletadas foram secas em estufa a 60°C por 72 h ou até peso constante.

Coleta de recursos florais: a análise de estruturas reprodutivas e recompensas florais considerou a amostragem de pólen e mel, as quais permitiram a determinação da origem floral e presença de pólen das espécies mais frequentes encontradas nas estações amostrais de acordo com cada localidade de produção. As amostras foram coletadas na Comunidade Quilombola de Degredo, município de

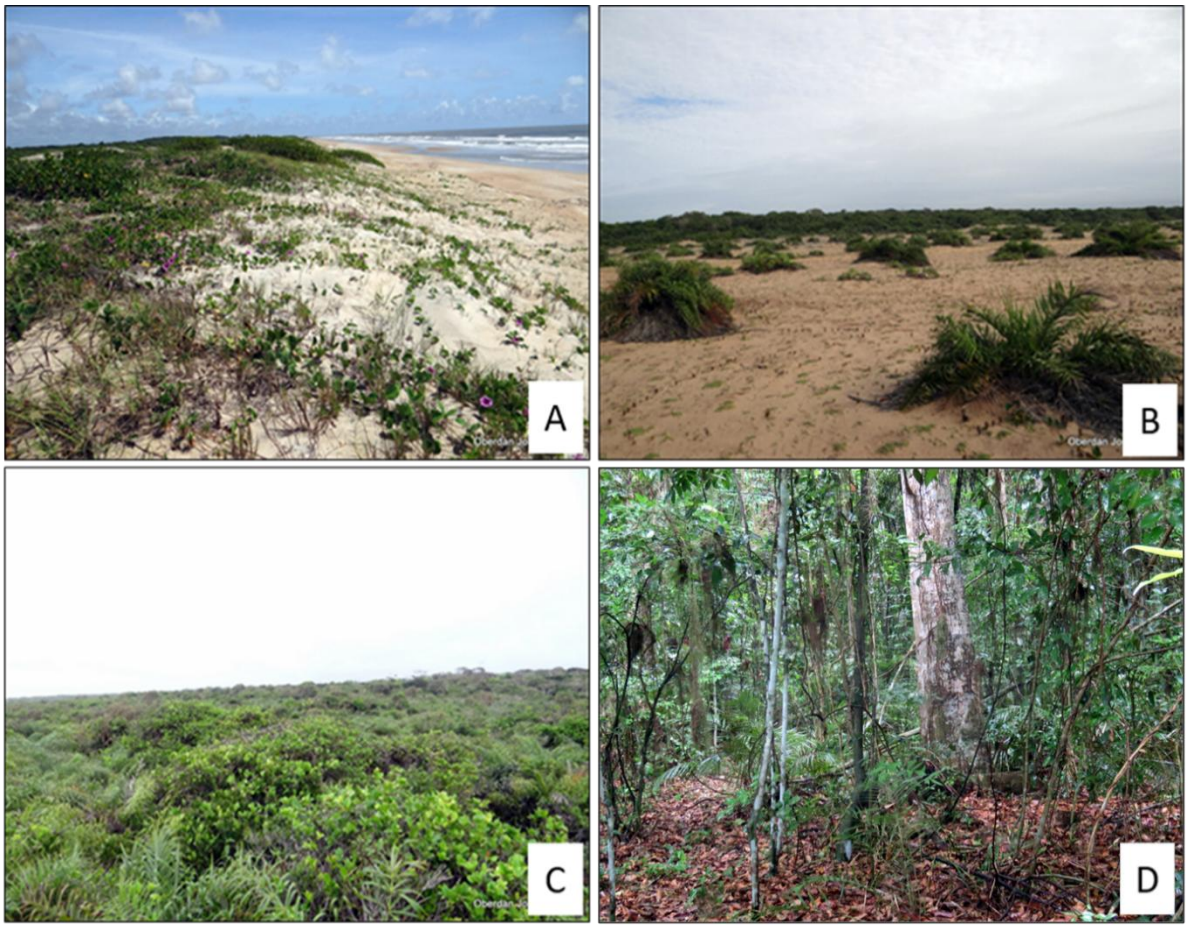
Linhares, próximo à área amostral de monitoramento da Restinga em Degredo (E10). O critério de escolha considerou o posicionamento intermediário das colônias em relação aos Compartimentos B e C, posicionamento que abrange o ecossistema Restinga, incluindo as três fitofisionomias estudadas no PMBA/Fest-UFES (herbácea, arbustiva e arbórea). Como a área de forrageamento das abelhas abrange um raio de três quilômetros no entorno da colmeia e, as colônias distam cerca de 2,8 km da linha da costa, a escolha deste setor atendeu aos critérios de avaliação de uso dos recursos no ecossistema estudado. Um total de três colmeias de *Apis mellifera* (Linnaeus, 1758) foram coletadas em cinco propriedades, totalizando 15 amostras para cada período. As amostras de pólen foram coletadas com o auxílio de coletores de pólen de plástico instalados na entrada das colmeias e pools de amostras de mel foram coletados diretamente dos favos. Estas amostras foram acondicionadas em tubos falcon esterilizados, acondicionadas a 22°C e encaminhadas para o Laboratório de Taxonomia de Fanerógamas (LABTAX) da Universidade Federal do Espírito Santo, para processamento e inventário polínico. Após processamento, alíquotas de 1g de pólen e mel foram encaminhadas em triplicata ao Laboratório de Espectrometria Atômica do Departamento de Química (LEA/UFES), para a determinação de elementos químicos. As análises foram encerradas e a meta foi cumprida com as coletas estipuladas para os meses de agosto e setembro de 2023.

2.1.2 Inventário Florístico e da Estrutura, e Fenologia da vegetação

O monitoramento das estações amostrais da Restinga reveste-se de extrema importância para a validação dos parâmetros de impacto do Material Ligado ao Desastre (MLD) de Mariana/MG via salsugem. O monitoramento foi realizado nas sete estações amostrais, estabelecidas para o Plano de Trabalho de 2022 do Tema Restinga, até setembro de 2024. A partir de outubro de 2024, o monitoramento foi realizado em seis estações amostrais, visto que a estação de Barra Nova (E4) deixou de ser monitorada. Especificamente, na estação amostral Mar Azul/Aracruz (E9) a Restinga é pouco desenvolvida e sob influência da aproximação da Formação Barreiras junto à costa, resultando em uma distribuição diferenciada da vegetação, implicando em logística diferencial em relação às demais estações amostrais.

Em cada uma das estações amostrais, o **inventário florístico** foi realizado por meio de caminhamento aleatório (FILGUEIRAS *et al*., 1994), nas áreas das linhas e parcelas marcadas em formação herbácea (halófila-psamófila, Figura 1A), arbustiva (aberta não inundável, Figura 1B, ou fechada não inundável, Figura 1C) e, até setembro de 2024, arbórea (formação florestal, Figura 1D) e fora delas. Espécimes férteis (com flores e/ ou frutos) observados foram coletados, de um indivíduo por espécie, em cada fitofisionomia, em todas as áreas, durante outubro/2018 a janeiro/2026. Para cada espécime, foram coletadas, sempre que possível, cinco duplicatas (com flores e/ou frutos), para envio a especialistas de outras instituições, com o objetivo de garantir sua identificação. Além disso, foram compiladas informações sobre a planta, como o hábitat, os estádios de floração e de frutificação e outras observações ecológicas ou morfológicas pertinentes. Por fim, foram obtidas as coordenadas geográficas das espécies, com o auxílio de um GPS, e realizada a documentação fotográfica.

Figura 1: Aspecto geral das formações vegetais nas estações amostrais do Tema Restinga, monitoradas ao longo da região costeira do Espírito Santo, no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Formação Herbácea não Inundável (A), Formação Arbustiva Aberta não Inundável (B), Formação Arbustiva Fechada não Inundável (C) e Formação Florestal não Inundável (D).



O material coletado foi prensado e fixado em álcool 70%, e transportado até o Herbário VIES, em Vitória, onde seguiu para o processo de desidratação (secagem) em estufas de circulação de ar a 60 °C, por um período médio de cinco dias. Após secagem do material, foi encerrado em sacos plásticos, levados ao freezer para descontaminação por sete dias. Após a descontaminação, um espécime representativo foi montado em cartolinas de tamanho padronizado (cerca de 42 × 29 cm), onde recebeu uma etiqueta com os dados obtidos em campo, compondo assim as exsicatas que foram identificadas e depositadas no Herbário VIES e no Herbário SAMES, da Universidade Federal do Espírito Santo.

Para o acompanhamento da dinâmica da vegetação no espaço e tempo, **o levantamento da estrutura da comunidade da Formação Herbácea não Inundável** foi realizado inicialmente em duas amostragens, a primeira em outubro/novembro/2018 (período Chuvoso Ano 1) e a segunda em maio/2019 (período Seco Ano 1). Como não foram encontradas diferenças significativas entre os períodos de avaliação, a periodicidade de amostragem exigiu intervalos mais longos a fim de se obter diferenças diagnosticáveis. Desta forma, outras avaliações foram efetuadas em fevereiro/2021 (período Chuvoso Ano 3), janeiro/2022 (período Chuvoso Ano 4), abril/2023 (período Seco Ano 5), janeiro/2024 (período Chuvoso Ano 6), abril/2025 (período Seco Ano 7) e janeiro/2026 (período Chuvoso Ano 8). Nessa formação, utilizou-se o método de parcelas alternadas de Müeller-Dombois e Ellenberg (1974),

consistindo em parcelas de 1 m², lançadas ao longo de uma linha perpendicular ao mar, obedecendo a alternância de lados e intervalos de 1 m. Em cada área foram estabelecidas dez linhas distribuídas sistematicamente em intervalos paralelos de 50 metros. Em cada parcela foram estimados visualmente os percentuais de área nua (AN) e cobertura vegetal (CV) de cada espécie encontrada, de acordo com Brower e Zar (1977). Os comprimentos dos transectos variaram conforme a distância entre o primeiro vestígio de vegetação e a transição com outra fisionomia.

No levantamento da **estrutura da vegetação na Formação Arbustiva Aberta/Fechada não Inundável,** foi utilizado o método de intercepto de linha (MÜELLER-DOMBOIS e ELLENBERG, 1974). A coleta foi inicialmente realizada em outubro/novembro/2018 (período Chuvoso Ano 1), entretanto, mudanças na estrutura desta vegetação demandam tempo para serem capturadas, exigindo que as avaliações futuras abranjam mais tempo. Assim, as avaliações seguintes foram efetuadas em abril/2021 (período Seco Ano 3), maio/2022 (período Seco Ano 4), abril/2023 (período Seco Ano 5), janeiro/2024 (período Chuvoso Ano 6) e janeiro/2025 (período Chuvoso Ano 7). Foram demarcadas sete linhas (orientadas por bússola) por toda extensão da vegetação, no sentido mar – continente, distribuídas sistematicamente em intervalos paralelos de 50 m. A extensão da linha variou de acordo com a largura da faixa de vegetação analisada. Os indivíduos lenhosos e herbáceos com altura igual ou superior a 50 cm, que interceptaram as linhas, foram incluídos na amostragem. Para cada indivíduo foram obtidas: a extensão do indivíduo interceptado pela projeção da linha e sua altura. Lianas e herbáceas menores que 50 cm foram anotadas apenas quanto à sua presença.

A **estrutura da vegetação na Formação Florestal não Inundável** foi avaliada segundo adaptação da metodologia sugerida por Gentry (1991), sumarizada por Phillips e Miller (2002) e enquadrada no Programa de Amostragem Rápida (HIGGINS e RUOKOLAINEN 2004). Tal metodologia é considerada eficiente para a estimativa da diversidade, pois inclui plantas jovens, árvores, arbustos, trepadeiras e hemiepífitas, geralmente não amostrados em parcelas de árvores (CLINEBELL *et al.,* 1995). A amostragem foi realizada anualmente e ao longo de três transectos de 2 x 50 m, totalizando 0,03 ha, estabelecidos perpendicularmente a uma linha base, distantes 50 m entre si, e 50 m da borda da floresta, para minimizar o efeito de borda e evitar a sobreposição de áreas amostradas. A amostragem foi realizada em duas faixas de 1 m ao longo de cada linha mestra (50m) orientada com bússola. Nos transectos foram incluídos todos os indivíduos com DAP (Diâmetro à Altura do Peito) igual ou superior a 2,54 cm. A altura de cada indivíduo foi estimada visualmente, tomada com o auxílio de uma tesoura de alto poda (10m), sempre pelo mesmo membro da equipe. Os indivíduos mortos também foram amostrados. Os indivíduos perfilhados acima do sedimento e abaixo da altura do peito (1,30 m) foram incluídos quando um dos seus ramos obedecia ao critério de inclusão, sendo anotado a CAP (Circunferência à Altura do Peito) de todas as ramificações para o cálculo da área basal. A amostragem inicial da comunidade foi realizada em outubro e novembro/2018 (período Chuvoso Ano 1), contudo, maiores intervalos foram necessários para captura de possíveis mudanças estruturais. Assim, as avaliações posteriores foram efetuadas anualmente, em julho e agosto/2021 (período Seco Ano 3), outubro/2022 (período Chuvoso Ano 5) e outubro/2023 (período Chuvoso Ano 6). Para o novo escopo, vigente a partir de outubro de 2024, foram excluídas as análises da formação arbórea.

A coleta de **dados fenológicos da vegetação** da Restinga durante o Ano 1 permitiu definir a sazonalidade de desenvolvimento da vegetação, mesmo sob efeito de condições climáticas durante anos superúmidos (2018-2019). Devido a necessidade de ajustes associados a periodicidade de coletas (ora mensal/trimestral), a média da intensidade de floração e frutificação foi definida semestralmente, dentro da periodicidade chuvoso e seco. A coleta de dados foi efetuada através de observações diretas de ao menos cinco indivíduos, previamente marcados, das espécies com maior valor de importância, definidos pelo estudo fitossociológico, bem como de espécies auxiliares como ameaçadas de extinção ou raras. A avaliação da presença e ausência das fenofases foi obtida por meio de observações dos estágios fenológicos das espécies em campo, que foram devidamente fotografadas. Observações complementares em indivíduos não marcados foram realizadas em cada comunidade, a fim de melhorar a interpretação dos dados e capturar efeitos isolados (e.g. fitossanidade).

2.1.3 Monitoramento ecofisiológico da vegetação de Restinga

Para a continuidade do monitoramento das **respostas ecofisiológicas** da vegetação de Restinga, as análises (campo e laboratoriais) foram realizadas nas seis estações amostrais e, devido a dificuldades de acesso em algumas das formações, o número de espécies amostradas variou de duas a cinco por formação. Estatisticamente, são apresentados neste relatório os resultados de duas espécies por formação: *Ipomoea imperati* e *Canavalia rosea* (herbáceas), *Allagoptera arenaria* e *Guapira pernambucensis* (arbustivas) e *Protium heptaphyllum* e *Manilkara salzmannii* (arbóreas).

Cinco indivíduos de cada espécie de interesse foram avaliados trimestralmente *in situ* nos polígonos amostrais já monitorados. Indivíduos das três formações vegetais foram analisados quanto a **produtividade primária** nas primeiras horas da manhã (entre 7 e 11 horas, horário solar), por meio da análise da Cinética de Emissão da Fluorescência Rápida (STRASSER *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2014; BACARIN *et al.;* 2016, CHEN *et al.*, 2016; KALAJI *et al.*, 2016; FONSECA *et al.*, 2023; GUDIN *et al.*, 2024), utilizando-se um fluorômetro portátil (Handy-PEA, Hansatech Instruments®, King's Lynn, Norkfolk, UK). Somados a isso, semestralmente, para as análises de assimilação fotossintética, as trocas gasosas foram estimadas utilizando-se um analisador de gases no infravermelho, portátil, (IRGA, modelo LCPro *T*, ADC BioScientific Ltd., England), sendo submetidas à radiação fotossinteticamente ativa artificial saturante (1.300 μmol m^{-2} s^{-1}), e em concentração de CO_2 ambiente (LANA-COSTA *et al.*, 2021, 2023).

Para as **análises laboratoriais** relacionadas aos aspectos ecofisiológicos, amostras vegetais foram coletadas semestralmente com tratamentos compostos por cinco indivíduos, congeladas em nitrogênio líquido (N_2) e armazenadas em laboratório a temperatura de -80ºC.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Contaminação do sedimento, do material depositado sobre as folhas (“Spray”) e dos tecidos vegetais, e granulometria

Análise dos elementos químicos: A quantificação analítica foi realizada pelos laboratórios: (1) Laboratório de Espectrometria Atômica do Departamento de Química da Universidade Federal do Espírito Santo (LEA/UFES), para análise de elementos químicos por decomposição pseudototal no sedimento, utilizando protocolos anteriormente estabelecidos (USEPA 3051A, 2007) e que foram modificados para a análise das amostras vegetais, bem como a quantificação de elementos-traço (fração total) nas amostras de material depositado sobre as folhas (“Spray”), que seguiu o método EPA 3015a para água (USEPA, 2007b). As amostras foram analisadas por ICP-MS (espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado) e ICP-OES (espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado); e (2) Laboratório de Análises do Solo, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (DPS/UFV), para análise de nutrientes biodisponíveis no sedimento (Fe, Mn, Cu e Zn por extrator de Mehlich-1) e micronutrientes no tecido vegetal (SARRUGE e HAAG, 1974), determinados por espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS). A caracterização das áreas costeiras de Restinga monitoradas pelo PMBA/Fest-UFES se baseou na análise das concentrações dos elementos químicos Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn, V e Zn. Dentre eles, os níveis de elementos totais presentes no sedimento apresentados no Estudo de Impacto Ambiental do Terminal Portuário de Uso Múltiplo da Nutripetro – EIA-Nutripetro, realizado em 2013 (PSG, 2013), foram usados como principal fonte de referência.

Análise física do sedimento: A determinação da granulometria dos sedimentos arenosos foi realizada pelo Laboratório de Geomorfologia e Sedimentologia Costeira (LAGES), na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Inicialmente, as amostras foram lavadas para a retirada do sal e colocadas na estufa para secar, a temperatura média de 40°C. Após a secagem, as amostras foram quarteadas por meio do quarteador do tipo Jones até o peso aproximado de 50 g. Na sequência, a amostra quarteada foi posta no agitador de peneiras por 15 minutos. Para o peneiramento foi utilizado um jogo de peneiras com malha de -2 a 4 φ (4 a 0,063 mm). Após o peneiramento, o sedimento retido em cada peneira foi pesado para a determinação do percentual de cada fração granulométrica. A partir do percentual das frações granulométricas, os parâmetros estatísticos propostos por Folk e Ward (1957) foram calculados para todas as amostras por meio do programa GRADISTAT (BLOTT e PYE, 2001).

Índice Integrado de poluição (IPI) e Porcentagem de Elementos Acima da Referência (PEAR): Para acessar os níveis de contaminação dos elementos minerais presentes no solo de Restinga, avaliadas neste monitoramento, foi calculado o Índice integrado de poluição (IPI) que deriva do índice de poluição utilizado para diagnóstico de solos (WEI e YANG, 2010). O cálculo do PI é a razão entre a concentração de um elemento e a concentração do elemento segundo uma referência. A partir daí, o IPI é obtido pela média dos PIs de todos os elementos avaliados, sendo possível, dessa maneira, classificar o solo do ambiente em quatro níveis distintos de poluição: baixo (IPI ≤ 1), médio (1 < IPI ≤ 2), alto (2 < IPI ≤ 5) e extremamente alto (IPI >5).

A Porcentagem de Elementos Acima da Referência (PEAR) representa o percentual de elementos, dentro do total analisado, que se encontram acima dos valores de referência, permitindo assim realizar uma análise da evolução espaço-temporal dos elementos químicos no solo das três formações vegetais de Restinga monitoradas.

Para a análise do IPI e PEAR, os dados foram avaliados utilizando-se valores norteadores preconizados no Estudo de Impacto Ambiental do Terminal Portuário de Uso Múltiplo da Nutripetro - EIA-Nutripetro - realizado em 2013 (PSG, 2013). Os resultados foram expressos em mapas temáticos com colorações referentes aos intervalos de classificação definidos.

Fator de bioacumulação (BAF): Para determinar a relação entre a concentração individual de elementos no sedimento e nas plantas selecionadas, o fator de bioacumulação (BAF- *Bioaccumulation Factor*) foi usado seguindo a fórmula proposta por Usman *et al.* (2012): $BAF = C_{folha}/C_{solo}$. Onde: C_{folha} é a concentração do metal na folha em mg/kg e C_{solo} é a concentração do referido metal no sedimento (mg/kg).

2.2.2 Inventário Florístico, estrutural e fenológico da vegetação

Após a coleta e processamento do material botânico, a **identificação das espécies** foi realizada por meio de chaves analíticas, diagnoses, descrições, ilustrações presentes na literatura, tipos nomenclaturais e consulta às coleções depositadas no Herbário SAMES, VIES e VIC e nos herbários virtuais (http://reflora.jbrj.gov.br/) e INCT-HVFF (http://inct.florabrasil.net/). Quando necessário, especialistas foram consultados para confirmação da identidade de espécimes. Todas as exsicatas foram digitalizadas e encontram-se disponibilizadas ao público em geral nos herbários virtuais REFLORA e INCT ou podem ser consultadas pelo site do Herbário VIES (http://herbario.ufes.br/consulta-ao-acervo) e SAMES (http://sames.jbrj.gov.br/v2/consulta.php). Duplicatas foram enviadas aos herbários que possuem pesquisadores vinculados ao projeto. A lista de **espécies inventariadas** está apresentada de acordo com a classificação do APG IV (2016), contendo informações sobre endemismo e raridade, de acordo com literatura específica (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2026, em construção) (GIULIETTI *et al.*, 2009; DUTRA *et al.*, 2015); e estado de ameaça, de acordo com a lista de espécies ameaçadas do Brasil (BRASIL, 2022) e do Espírito Santo (FRAGA *et al.*, 2019; ESPÍRITO SANTO, 2022). Espécies exóticas, naturalizadas e potencialmente invasoras seguiram o conceito de Moro *et al.* (2012) e foram identificadas conforme literatura usual (I3N, 2020).

O **inventário polínico**, das amostras de pólen coletadas de propriedades de apicultura no entorno da Estação 10 (Degredo - Linhares), foi realizado pontualmente em agosto/setembro de 2023, a fim de determinar a origem floral das espécies mais frequentes indicadas pelo estudo fitossociológico em cada estação. Para isso, as amostras foram tratadas quimicamente segundo protocolos anteriormente descritos (LOUVEAUX *et al.*, 1978; JONES e BRYANT, 2004) e, após acetólise (ERDTMAN, 1960), o material foi montado em lâminas. O inventário polínico seguiu o protocolo de Moar (1985). Os tipos de pólen identificados foram classificados de acordo com a frequência de classes propostas por Louveaux *et al.* (1978): pólen predominante (> 45%), pólen secundário (15-45%), pólen importante (3-15%), pólen

menor (1-3%) e vestígios pólen (<1%). A identificação dos tipos de pólen foi realizada através de literatura e consulta a especialistas.

Os dados obtidos no levantamento fitossociológico possibilitaram a **caracterização da estrutura da vegetação**, utilizando descritores absolutos e relativos de densidade: dominância, frequência e valor de importância (VI) segundo Brower e Zar (1984), calculados com o programa Fitopac 2.1.2.85 (SHEPHERD, 2010).

A frequência possui descritores absolutos e relativos e exprime a distribuição espacial de cada espécie na área, indicando o número de unidades amostrais que uma espécie ocorre em relação ao número total de unidades amostrais. Assim, a frequência absoluta (FA) pode ser calculada através da fórmula:

$$FA = nPe/nTPe,$$

Onde: nPe é o número de parcelas com ocorrência da espécie e T o número total de parcelas.

A frequência relativa (FR) é a relação entre a frequência absoluta de determinada espécie (FAi) e a somatória de frequências absolutas de todas as espécies (ΣFA), obtida através da fórmula:

$$FR = (FAi/\Sigma FA)*100)$$

A Dominância absoluta de espécie (DoA) refere-se à taxa de ocupação do ambiente pelos indivíduos de uma dada espécie por unidade de área, geralmente por hectare, calculada pela equação:

$$DoA = CTxU/A,$$

Onde CT = ΣnCi, n é o número de parcelas, C é a cobertura da espécie por m², U é a área e A é a área total amostrada.

No caso da dominância relativa da espécie (DoR), os valores são obtidos através da fórmula:

$$DoR = 100xDoA/DoT,$$

Onde DoT é a somatória das dominâncias absolutas (m^2/ha) e valor de importância (VI, que é a importância de cada espécie na comunidade, reunindo os critérios de análise dos dois parâmetros: FR e DoR) de cada espécie encontrada (BROWER e ZAR 1984).

Foi calculado o Índice de Diversidade de Shannon-Weaver para cada comunidade ao longo das estações. Para análise de similaridade utilizou-se o Índice de Similaridade de Sorensen (MÜELLER-DOMBOIS e ELLENBERG, 1974), em que as interpretações se deram pela média de grupo. Essa análise foi realizada pelo programa PAST ver. 2.17. Assumiu-se que o índice de similaridade de Sorensen indica alta similaridade quando acima de 0,50 (MIRANDA e CARVALHO 2009). Com o objetivo de classificar as espécies vegetais no que se refere a forma de vida, foi adotado o critério de classificação quanto à forma de vida apresentado por Müller-Dombois e Ellenberg (1974).

Para a **fenologia da vegetação**, a partir dos dados obtidos pelas avaliações *in loco*, o percentual médio de cada fenofase em uma dada comunidade foi obtido para ser correlacionado com os dados abióticos, ecofisiológicos e fitossociológicos já obtidos no âmbito do PMBA/Fest-UFES.

Os estágios fenológicos vegetativos e reprodutivos foram definidos de acordo com Morellato *et al.* (1989). Foram tomados dados fenológicos vegetativos e reprodutivos avaliados sob critérios coerentes com a bibliografia (MORELLATO *et al.,* 1989). O período de brotamento (i) foi definido como aquele que se inicia com o aparecimento de pequenas folhas membranáceas, brilhantes e com coloração verde clara, alaranjada, amarelada ou avermelhada. A caducifolia (ii) foi definida como o período com queda de folhas perceptível pela presença de ramos nus ou copas parcialmente falhadas, folhas com coloração amarronzada e enroladas e, finalmente, a presença de folhas da espécie acumuladas sob a árvore. A floração (iii) foi definida como aquela em que as flores estavam com botões ou abertas (antese), sendo o período de frutificação aquele em que os frutos estão totalmente formados, maduros e prontos para a dispersão.

2.2.3 Análises bioquímicas e alterações celulares da Restinga monitorada

Para as análises de **Metabólitos primários**, os conteúdos de clorofila de amostras foliares das espécies de cada formação vegetal foram extraídos conforme previamente descrito (LISEC *et al.*, 2006) e determinados por espectrometria (WELLBURN, 1994). Os níveis de amido, sacarose, glicose e frutose foram determinados segundo Fernie *et al.* (2001). Malato e prolina foram determinados como descrito por Nunes-Nesi *et al.* (2007) e Carillo e Gibon (2011), respectivamente. Proteínas e aminoácidos foram avaliados conforme descrito previamente por Bradford (1976) e Yemm e Cocking (1955). Para determinar possíveis mecanismos de respostas à metais, o conteúdo de metalotioneína foi determinado segundo Viarengo *et al.* (1997) e Erk *et al.* (2002), com modificações.

Para a avaliação das respostas do **Estresse oxidativo**, foram determinadas as atividades das enzimas do sistema antioxidante, conforme descrito em Lima *et al.* (2002) e Pinheiro *et al.* (2004). As respostas do sistema antioxidante não enzimático foram determinadas conforme previamente descrito por Kampfenkel *et al.* (1995), Sarker e Oba (2018) e Pedrete *et al.* (2020), com modificações. Somados a isso, a extensão de danos celulares foi estimada pela quantificação de aldeído malônico (Malondialdeído - MDA) via substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), conforme descrito por Cakmak e Host (1991) e Lima *et al.* (2002), com modificações.

No **Diagnóstico molecular**, sequências de outras espécies são utilizadas como elementos de 'investigação' do acervo (ALTSCHUL *et al.*, 1990), para identificar as regiões candidatas a genes de interesse. As sequências de aminoácidos deduzidas das fases de leitura aberta (*Open Reading Frame* - ORFs) são então comparadas por meio da ferramenta "ClustalW" (THOMPSON *et al.*, 1994). Para a análise da expressão dos genes foi utilizada a metodologia de Reação em cadeia da polimerase (*polymerase chain reaction* - PCR) quantitativa, que utiliza o kit 'Platinum SYBR Green qPCR SuperMix-UDG' (Invitrogen) e o termociclador QuantStudio™ 3 Real-Time PCR System (Applied Biosystems™).

Para **Alterações celulares**, a avaliação de possíveis alterações genotoxicológicas *in vivo*, na vegetação de Restinga monitorada, foi realizada pela detecção de quebras simples do DNA de espécies selecionadas nas estações amostrais, seguindo o protocolo de Olive (1988). Amostras de folhas foram homogeneizadas e suas células lisadas. Em seguida, as mesmas foram levadas ao banho maria em 60°C por 10 minutos, incubadas por 30 minutos a 4°C, e finalmente centrifugadas por 5 minutos em

8000 *g* à 4°C, tendo seu sobrenadante recolhido. As amostras em conjunto com o reativo de Hoechst foram lidas em placa preta para medição da fluorescência a 360 nm com emissão de 450 nm em espectrofotômetro Spectramax 5.

2.2.4 Análise de dados e determinação da Situação de Risco e Alerta de Perigo

De posse dos dados referentes aos atributos físico-químicos do ambiente e dos parâmetros biológicos da vegetação, testes estatísticos foram realizados a fim de verificar as possíveis relações entre variáveis respostas, como parâmetros florísticos, estruturais e ecofisiológicos da flora da Restinga e variáveis de causa, como concentrações dos elementos químicos associados ao MLD, bem como campanhas de amostragem e formações vegetais. As análises estatísticas realizadas (Análise de Variância, Análises multivariadas - Análise de Componentes principais, e Análises de Correlação) permitiram a seleção de parâmetros bióticos que responderam aos efeitos da contaminação por metais.

Em virtude da ausência de informações pretéritas robustas, sobre parâmetros biológicos e concentrações de metais, que pudessem ser utilizadas como comparativo, ou de índices que não utilizem pontos “controle” para seu cálculo, a “Situação de risco” determina a variação intrínseca de cada parâmetro correspondente aos períodos de avaliação.

O cálculo da SITUAÇÃO DE RISCO foi realizado baseando-se em uma comparação espaço-temporal, que levou em consideração a estação amostral e os períodos de coleta de dados. Primeiramente, os parâmetros foram submetidos ao cálculo da SITUAÇÃO DE RISCO como descrito na sequência abaixo:

$$(1)\ \frac{Vmax\ -Vmin}{3} = X$$

Sendo:

Vmax = valor máximo do parâmetro;

Vmin = valor mínimo do parâmetro;

X = terça parte da variação de valores.

O valor de *X* foi então usado para o cálculo das equações 2, 3 e 4, obtendo assim os intervalos *y1*, *y2* e *y3*:

(2) $y1=Vmin+X$

(3) $y2=y1+X$

(4) $y3=y2+X$

Onde se assume que: *y1*, *y2*, e *y3* representam os limites máximos para três categorias de risco (Quadro 1).

Quadro 1: Categorias de risco, segundo a metodologia de análise de Situação de Risco apresentada.

Equação	Categoria
Vmin ≤ *V* ≤ y1	A
y1 < *V* ≤ y2	B
y2 < V ≤ y3	C

Sendo, *V* o valor do parâmetro em uma dada formação vegetal, por estação e por período.

Para cada parâmetro biótico foram determinadas três categorias de Situação de Risco: Alto, Moderado e Baixo. A classificação de cada parâmetro baseou-se no efeito biológico da presença do metal.

A determinação prévia das categorias (A, B e C) se baseia em condições fisiológicas específicas e nas interpretações matemáticas do parâmetro (correlação e análise de componentes principais - PCA) obtidas anteriormente. Nos casos em que é sabido que valores elevados do parâmetro são fisiologicamente bons e valores baixos são um indicativo de estresse ou ineficiência do sistema, diz-se que o parâmetro é inversamente proporcional aos teores de metais. Portanto, a categoria A, que possui os valores mais baixos, é considerada de alto risco, B de risco moderado e C de baixo risco.

Inversamente, os parâmetros nos quais a relação com o aumento de metais é diretamente proporcional, ou seja, com valores elevados do parâmetro, a categoria C é a de Situação de alto risco, B de Situação de risco moderado e A de Situação de baixo risco. Esta avaliação, baseada na proporcionalidade do efeito biológico com a concentração de metais, acompanha o mesmo raciocínio proposto por Beliaeff e Burgeot (2002) nas proposições acerca do cálculo do índice de resposta integrada do biomarcador (IBR), que utiliza regiões não impactadas como controle.

O ALERTA DE PERIGO possibilita a integração dos dados resultantes da Situação de Risco das diferentes categorias de resposta biológica, sendo uma representação conclusiva e sintética que responde acerca do *status* de Vitalidade da vegetação, indicador biológico do Tema Restinga. Ele é determinado a partir do cálculo do percentual de parâmetros selecionados que se encontram em situação de alto risco em uma determinada estação e formação. Quando 50% ou mais dos parâmetros se encontram em alto risco em um determinado ponto de coleta, assume-se que aquele ponto esteja em perigo, como pode ser representado a seguir:

$$\frac{n° \; de \; indicadores \; em \; Situação \; de \; risco \; ALTO}{número \; de \; indicadores} * 100 \geq 50\%$$

Assim, se as condições da equação são cumpridas, há um Alerta de Perigo local.

Vale ressaltar, que a Vitalidade da Vegetação na fisionomia arbórea da Estação E9 (Mar Azul - Aracruz) apresentou riqueza e estrutura peculiares em relação às demais estações amostrais e, por essa razão, não foi comparada às demais estações. Os dados obtidos para esta fisionomia são restritos a fenologia (floração e frutificação) das espécies monitoradas. A produtividade primária, o estresse oxidativo e o metabolismo primário, assim como a fenologia, foram obtidos apenas para as fisionomias herbácea e arbustiva desta estação, permitindo comparações de Vitalidade da Vegetação com as outras estações monitoradas.

2.2.5 Estratégias para divulgação científica e popularização da ciência para conservação da Restinga

A divulgação dos resultados da Restinga obtidos durante o monitoramento e a popularização da ciência são estratégias de promoção da conservação do ecossistema Restinga. Para melhorar o alcance dos resultados, foi elaborado um manual de identificação das espécies encontradas nas estações amostrais, através do banco de imagens digital e literatura especializada. O critério de escolha das espécies levou em conta a dominância, a raridade e o status de conservação das espécies encontradas nas estações. O layout foi elaborado no software Canva.

A segunda estratégia de divulgação dos resultados incluiu a coleta, preparação e incorporação de frutos e sementes na carpoteca, oriundos das estações amostrais avaliadas durante o monitoramento. Os propágulos foram descontaminados a fim de constituírem a coleção didática do Herbário VIES, destinada aos projetos de extensão que atendem escolas e a comunidade geral. Somado a isso, folders foram produzidos a fim de popularizar as temáticas envolvendo (i) a conservação do ecossistema Restinga, (ii) a proteção de espécies ameaçadas encontradas na Restinga do rio Doce, (iii) o reconhecimento e os malefícios causados por espécies exóticas invasoras e (iv) a divulgação de um canal de comunicação destinado a aumentar os registros de espécies pouco conhecidas na Restinga do rio Doce, através da participação da população local por meio da ciência cidadã.

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

O monitoramento da Restinga no âmbito do PMBA/Fest-UFES se iniciou com coletas do inventário florístico e observações fenológicas e, após identificação e definição das espécies a serem avaliadas por meio das análises fitossociológicas, as análises ecofisiológicas tiveram início (janeiro de 2019). Em janeiro/2020 uma nova estação amostral foi incluída (Estação 9) no litoral de Aracruz. Nesta localidade (Mar Azul), não houve avaliação fitossociológica, por estar situada em uma região com predomínio de enseadas abrigadas e intercaladas por falésias. A área amostral é caracterizada por conter Restinga com formação herbácea inconspícua, sob frequente abrasamento das ondas. A formação arbustiva é fechada e, algumas vezes, tão estreita que pode ser confundida com a formação arbórea. Assim, as características peculiares desta estação, principalmente o fraco desenvolvimento da formação herbácea, impediram comparações de sua estrutura de comunidades com as outras estações amostrais, sendo realizados somente o inventário florístico, a fenologia e as análises ecofisiológicas.

Para o inventário taxonômico e o inventário da estrutura da comunidade, houve redução do período amostral. O Plano de trabalho de 2018 contemplou análises fenológicas mensais, que foram reprogramadas para serem analisadas trimestralmente após 2022. Para o Novo Plano de Trabalho, a avaliação fenológica das comunidades vegetais foi também realizada por análise de imagens de satélite, a fim de avaliar resposta fenológica por meio de índices de vegetação, permitindo comparações dos resultados entre série histórica do PMBA/Fest-UFES e anteriores ao rompimento da Barragem de Fundão.

As análises relacionadas ao depósito de material sobre as folhas das plantas da Restinga (“Spray”), provenientes do aerossol marinho, foram analisadas em um primeiro momento no Ano 1 e retomadas a partir do período Seco do Ano 3, com nova metodologia, sendo realizadas por outro laboratório, a fim de contornar entraves logísticos e garantir a celeridade das análises.

Para as análises de estruturas reprodutivas e recursos/recompensas florais das espécies-chave selecionadas nas estações amostrais, a coleta de pistilos e estames tornou-se inviável devido à quantidade de flores que seriam necessárias para obter uma amostra. Como o inventário polínico pode indicar a presença das espécies com maior valor de importância e a análise química de pólen e mel pode indicar traços de contaminação, cujos valores de referência são reconhecidos pelo poder público, não houve a necessidade de analisar estruturas reprodutivas.

Dessa forma, a análise de néctar foi realizada por meio do mel (que é um produto produzido pelas abelhas a partir do néctar recolhido de flores) coletado em propriedades de apicultores na Comunidade Quilombola de Degredo, município de Linhares, próximo à área amostral de monitoramento da Restinga em Degredo (E10). Essa decisão foi tomada, principalmente, após publicação do estudo de contaminação de pólen e néctar na região de Mariana e Barra Longa, publicado por Rangel *et al.* (2022), que se tornou uma referência para comparação dos nossos dados. A análise de elementos químicos foi restrita a pólen e mel (que são provenientes de androceu e gineceu das plantas) por estes parâmetros serem suficientes para comparar os resultados com valores de referência reconhecidos pelo poder público. A ausência de coletas na localidade de Meleiras/Conceição da Barra justifica-se em função da carência de uma associação de apicultores na região. Esta área foi inserida preliminarmente como área alternativa de estudo, mas limitações de ocorrência reconhecida de uma associação impediram a extensão do estudo até a região.

As análises físicas do sedimento apresentaram mudança de metodologia para o Plano de Trabalho de 2022. Anteriormente, as análises eram realizadas por um laboratório de análise de solos e, atualmente, a fim de melhor integrar os resultados entre temas do Ambiente Costeiro, as análises estão sendo realizadas pelo laboratório de sedimentologia participante do PMBA/Fest-UFES. A adoção de metodologias distintas requer a adaptação e alinhamento do tratamento dos resultados.

As amostras de solo/sedimento do Tema Restinga foram analisadas durante o período de outubro de 2018 a julho de 2022 pelo Laboratório de Física do Solo, na Universidade Federal de Viçosa (CRP - UFV). A partir do novo ciclo, as amostras passaram a ser analisadas pelo Laboratório de Geomorfologia e Sedimentologia Costeira (LAGES), na UFES, que integra o PMBA/Fest-UFES no Tema Praias, sob coordenação da Prof. Dra. Jacqueline Albino. Os resultados processados pelo LAGES apresentaram diferenças em relação à frequência granulométrica encontrada anteriormente, especificamente na fração lamosa (<62.5 mm), em relação à abundância da lama e a distinção entre as subfrações de silte e argila, o que anteriormente era realizado na UFV. A diferença diz respeito ao uso de métodos distintos utilizados para as análises da granulometria da fração fina, anteriormente realizadas pelo método de pipetagem na UFV e sem pré-processamento de lavagem. O LAGES usualmente realiza a

granulometria da fração fina por meio de um granulômetro a laser, no qual a amostra é previamente lavada e a matéria orgânica é queimada.

Uma vez que a fração lamosa da Restinga é composta majoritariamente por matéria orgânica, e não por minerais siliciclásticos, grande parte é perdida no momento de lavagem e queima, impossibilitando a quantificação desta fração pelo granulômetro a laser. Isto ocorre, pois, o método de análise granulométrica de sedimento é realizado apenas para minerais, diferente da análise de solo. Nesta metodologia, a matéria orgânica pode ser quantificada, justamente através do processo de queima, entretanto, não é usual identificar o tamanho das partículas desta matéria, já que são compostos de agregados orgânicos.

A análise de genotoxicidade nas espécies *in situ* se deu por meio do teste denominado DNA *Strand Break*, o qual quantifica as quebras simples no material genético, realizado nas folhas das plantas. Foram utilizadas folhas de plantas da formação herbácea coletadas no Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES.

2.4 ALTERAÇÕES NA MALHA, FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADAS EM OUTUBRO DE 2024: CONSEQUÊNCIAS PARA AS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES

Durante a execução do monitoramento do Tema Restinga, com a implementação do novo plano de trabalho, vigente a partir de outubro de 2024, houve o ajuste na malha amostral originalmente estabelecida, consistindo em: (i) exclusão da formação arbórea, mantendo-se apenas as formações herbácea e arbustiva; e (ii) descontinuidade da estação Barra Nova (E4), conforme deliberação CIF N° 803, de 08 de agosto de 2024.

Não é mais necessário destacar que a formação arbórea constitui uma fitofisionomia relevante no ecossistema Restinga, desempenhando papel fundamental na estruturação da paisagem, na manutenção da biodiversidade e nos processos ecológicos associados. Porém torna-se necessário destacar mais uma vez sua importância e as possíveis consequências de tal exclusão: 1° Cabe ressaltar o que foi descrito por Myers *et al.* (2000), quando propuseram o Bioma Mata Atlântica como um “hotspot” global de diversidade sendo, portanto, um importante laboratório natural para pesquisas, pois inclui muitos ecossistemas diferentes. 2° A restinga (um ecossistema costeiro) faz parte deste mosaico de ecossistemas margeando a Mata Atlântica no estado do Espírito Santo, respondendo a consideráveis variações climática, edáfica e ecológica; 3° A organização geomorfológica, a distância da linha de praia, os diferentes níveis de influência do lençol freático (presença de inundações) e a composição florística foram os principais fatores responsáveis por uma classificação mais simples desse ecossistema, como o conjunto de formações com vegetação herbácea, arbustiva e florestal (PEREIRA, 2003, 2022; MAGNAGO *et al.*, 2010, 2013); 4º Na formação arbórea são encontrados, em sua maioria, indivíduos de porte mais alto e folhas largas colonizando solos rasos, úmidos e ácidos, ricos em matéria orgânica e com maiores concentrações de nutrientes (LOURENÇO Jr et al., 2021); 5º Por se localizar, em geral, em faixas mais internas do gradiente costeiro no sentido mar-continente, essa formação tende a abrigar espécies com menor grau de adaptação aos estresses ambientais

típicos das zonas mais próximas ao mar; 6º Por serem em sua maioria plantas lenhosas perenes, possuem comportamento fisiológico muito peculiar (germinação e estabelecimento das plântulas lentos, crescimento vegetativo e reprodutivo longos, lentos e muito dependentes das variáveis climáticas, edáficas e ecológicas); 7º Assim, ao se considerar que o ecossistema Restinga foi adotado pela equipe de pesquisadores da área como sendo o conjunto de três formações vegetais, para a equipe técnica, com a exclusão de uma das fitofisionomias da restinga, esta abordagem deixa de ser considerada "Restinga", mas sim apenas "Formação arbustiva e herbácea da região costeira".

Conclui-se, portanto, que a exclusão da formação arbórea irá gerar vieses amostrais relevantes devido a sua estrutura distinta e susceptível. Por outro lado, sua continuidade irá permitir uma avaliação mais abrangente e robusta dos efeitos de contaminantes depositados sobre as folhas (spray) e tecidos vegetais e ainda sobre a estrutura da vegetação a longo prazo. Esta exclusão pode ainda limitar a capacidade dos estudos a longo prazo em detectar respostas ecológicas mais sensíveis a alterações ambientais como o ciclo reprodutivo destas plantas.

Embora o indicador não tenha deixado de ser calculado, a exclusão da formação arbórea e da estação Barra Nova (E4) produz um efeito que extrapola a escala pontual dessas unidades, repercutindo diretamente na capacidade de interpretação integrada do ecossistema de Restinga como um todo. A partir dessa deliberação, os dados dessas porções deixam de ser atualizados, interrompendo suas respectivas séries temporais, enquanto as demais estações e formações vegetais seguem com atualização regular.

Essa descontinuidade não se limita à perda local de informação, mas reduz a representatividade estrutural do monitoramento, uma vez que a formação arbórea compunha um item essencial da heterogeneidade funcional da Restinga. Sua retirada compromete a construção de inferências abrangentes e integradas sobre o ecossistema, enfraquecendo as conclusões quando consideradas em toda a extensão analisada. Da mesma forma, a interrupção da estação E4 rompe a continuidade da série histórica, restringindo comparações diretas com períodos anteriores nesse recorte específico.

Ainda assim, a manutenção das formações herbácea e arbustiva, associada à continuidade das demais estações, preserva o conjunto analítico do monitoramento, assegurando a geração de dados importantes para a detecção de padrões do indicador do tema.

Importante destacar que as demais análises permanecem sendo realizadas conforme os protocolos já estabelecidos e continuam a ser aplicadas a todas as estações e formações vegetais atualmente monitoradas. As alterações realizadas não implicaram mudanças metodológicas no indicador avaliado, tendo em vista a independência em termos de estação amostral ou formação vegetal, mas impactaram a possibilidade de atualização da série histórica em relação aos pontos e formações excluídos.

Uma vez que as análises são realizadas de forma similar em todas as formações e estações, nenhuma variável ou indicador deixou de ser calculado.

Especificamente quanto as macroatividades analíticas removidas (Sensoriamento remoto, cultivo protegido e microbiota do solo), destacam-se impactos distintos e complementares: a retirada das análises de sensoriamento remoto elimina a possibilidade de análises em escala de paisagem e a integração espacial contínua dos parâmetros, reduzindo a capacidade de extrapolação dos resultados; a exclusão dos experimentos em cultivo protegido restringe a investigação de relações causais e mecanismos fisiológicos sob condições controladas, limitando parte da interpretação processual dos padrões observados em campo; e a remoção das análises de microbiota do solo compromete a compreensão das interações biogeoquímicas e dos processos subterrâneos que sustentam a dinâmica da vegetação. Em conjunto, essas ausências enfraquecem a abordagem multiescalar do monitoramento.

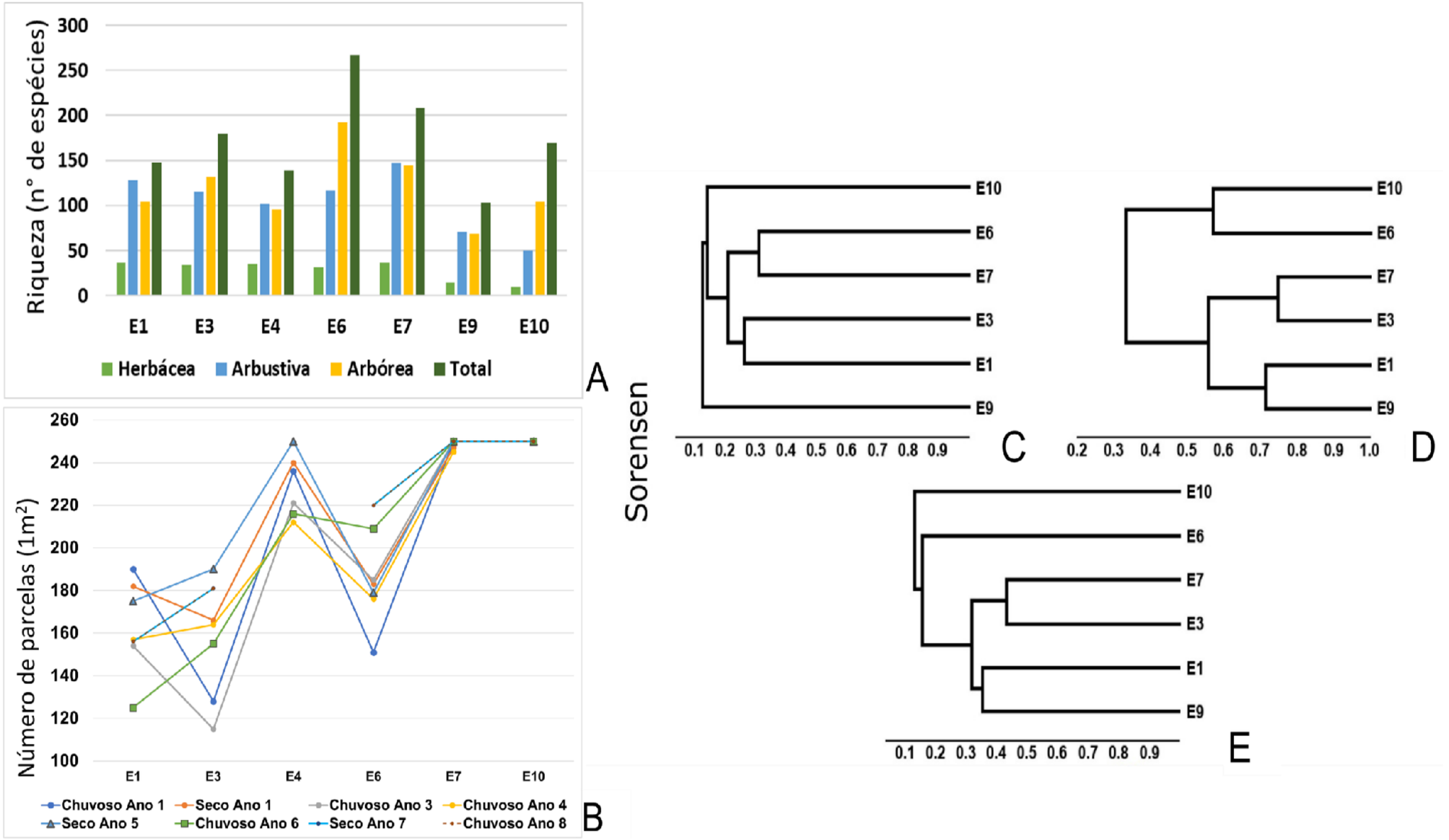
Para o Tema Restinga não houve a adição de novas estações amostrais ou reposicionamento.

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.

Figura 2: Resultados espaço-temporais dos parâmetros florístico-fitossociológicos avaliados em cada formação vegetal (Herbácea; Arbustiva; Arbórea) de Restinga monitorada no PMBA/Fest-UFES entre períodos Chuvoso Ano 1 (2018) a Chuvoso Ano 8 (2026). Riqueza florística das formações vegetais entre as estações amostrais **(A)**; Variação espaço-temporal do número de parcelas na formação herbácea entre estações amostrais monitoradas (**B**); Similaridade florística entre estações amostrais **(C)**, para a formação herbácea **(D)** e para a formação arbustiva **(E)**. Para o novo escopo, vigente a partir de outubro de 2024 (Chuvoso Ano7), foram excluídas as análises da formação arbórea e da Estação Barra Nova (E4).



* Nas análises de similaridade florística (Figura 2C-E) foi desconsiderada a riqueza de espécies das estações descontinuadas (E2, E4, E5 e E8), bem como da vegetação arbórea. Assim, o uso de dados coletados nas estações ativas abarca informações que traduzem as relações florísticas atuais entre as áreas de estudo, conforme o incremento de novas espécies ao longo das campanhas de coleta.

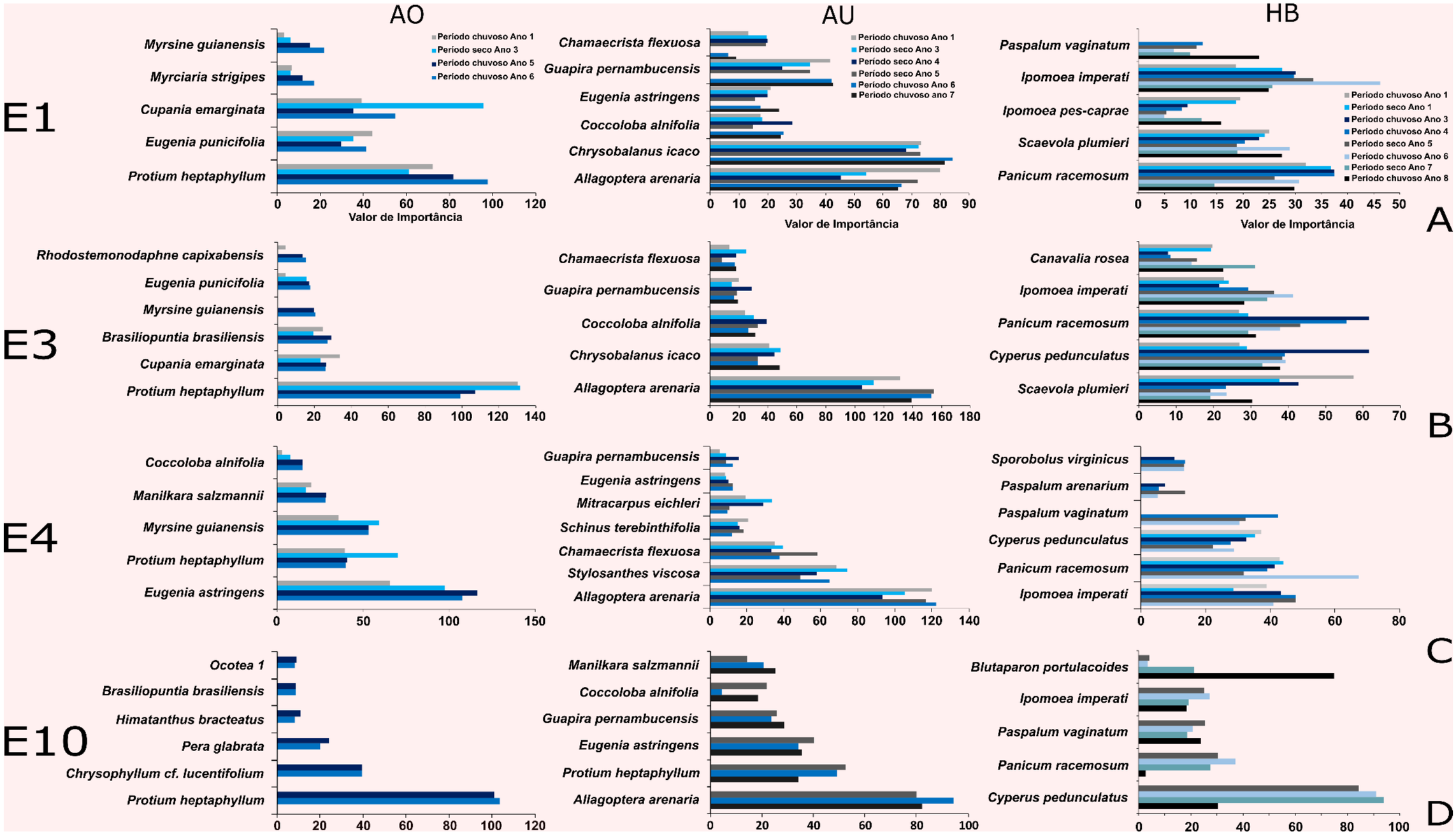
Os resultados da compartimentação do litoral são expressos pela Figura 2 na qual são demonstradas a riqueza florística (Figura 2A), o número de parcelas (Figura 2B) e o dendrograma de similaridade entre as estações (Figura 2C, D e E). As estações Cacimbas (E6) e REBio Comboios (E7), do Compartimento B', se destacam por sua riqueza de espécies, seguidas pelos Compartimentos C, entre Aldeia do Coco (E3), Degredo (E10), sendo a estação de Mar Azul (E9), do compartimento A, a que possui menor riqueza (Figura 2A). No entanto, com a exclusão das estações E2, E4, E5 e E8 das análises de similaridade florística, os dendrogramas passaram a apresentar uma nova configuração de relacionamento florístico entre as formações herbáceas e arbustivas (Figura 2D, E). Dessa forma, as particularidades anteriormente observadas para os compartimentos A e C não foram corroboradas na presente análise (Figura 2D, E). A baixa similaridade detectada entre as áreas está relacionada à composição florística bastante diferenciada, mesmo tratando-se de formações de mesma natureza, isto é, herbáceas e arbustivas (Figura 2C). Entretanto, sob o ponto de vista fitofisionômico, essas formações apresentam diferenças marcantes. Na estação localizada na APA Conceição da Barra (E1), por exemplo, a presença de dunas indica uma área a sotavento, condição que favorece maior riqueza de espécies (Figura 2A), incluindo algumas registradas exclusivamente nesse ambiente, como *Aspilia floribunda* (Asteraceae). Essa espécie ocorre formando populações expressivas em comparação às áreas mais expostas, aumentando, consequentemente, a probabilidade de amostragem em razão de sua elevada densidade. Por outro lado, em Degredo (E10), a ampla extensão da formação herbácea, associada possivelmente à presença de sedimentos visualmente mais ricos em areia de origem fluvial em detrimento daquela proveniente da plataforma continental, favorece a dominância fisionômica de espécies como *Axonopus pressus* (Poaceae). Soma-se a isso a intensa dinâmica marinha da região, onde o avanço frequente do mar sobre a formação, aliado à ação constante de ventos fortes, cria condições ambientais seletivas, favorecendo determinadas espécies em detrimento de outras. Outro aspecto relevante refere-se às formações arbustivas, que podem apresentar estrutura aberta ou fechada. Essa condição influencia diretamente a composição florística, favorecendo a inclusão de determinadas espécies e restringindo outras nas análises comparativas.

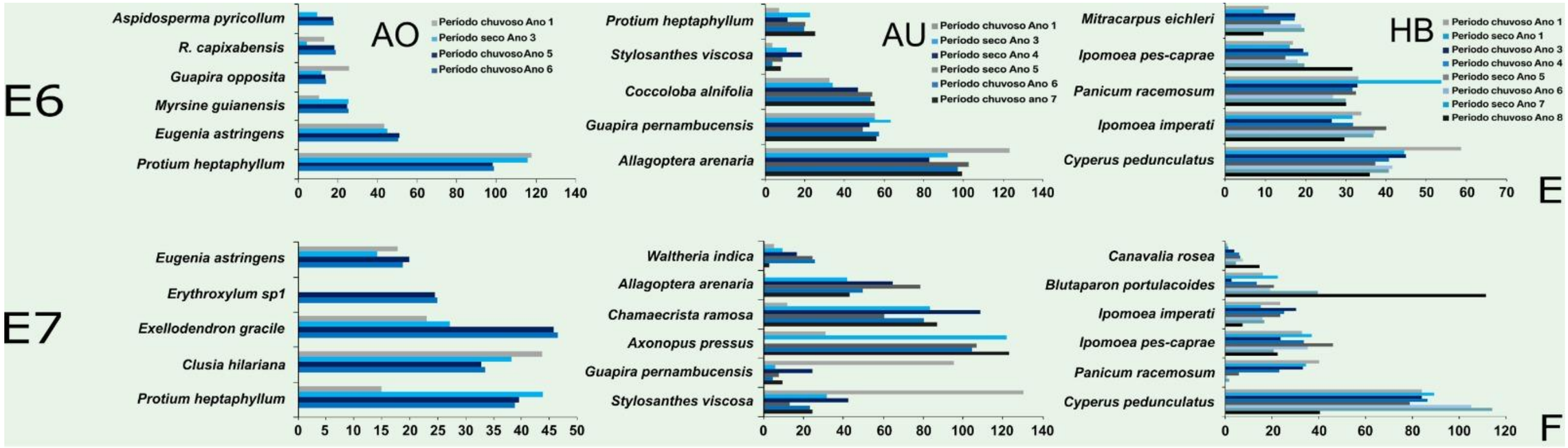
A comparação entre as áreas considerando a fisionomia herbácea (Figura 2D) indica elevada similaridade entre as áreas, condição frequentemente observada em formações associadas à linha de praia. Grande parte das espécies possui ampla distribuição ao longo da costa brasileira, incluindo espécies pantropicais, como *Scaevola plumieri*, aspecto que contribui para os elevados valores de similaridade obtidos. As alterações observadas na composição florística podem estar relacionadas à sazonalidade, uma vez que parte dessa comunidade está sujeita, em determinadas épocas do ano, à ação de marés mais elevadas. Nessas situações, parte da vegetação pode ser carreada, especialmente nas estações E1 e E7, embora essas áreas apresentem capacidade de recuperação. Os dados apresentados nos diferentes gráficos evidenciam essas alterações principalmente entre as espécies mais próximas do mar, como *Blutaparon portulacoides*. Mesmo quando comparadas as áreas menos similares dentro do conjunto analisado, os valores obtidos permanecem relativamente elevados, reforçando a homogeneidade dessa formação ao longo dos diferentes compartimentos.

Na comparação entre as áreas considerando a vegetação arbustiva (Figura 2E), o conjunto analisado apresentou similaridade variando de média a alta. Apesar da baixa similaridade observada entre as áreas (todas abaixo de 50%), o agrupamento formado pelas estações E3 e E7 pode estar relacionado à condição mais aberta da formação, caracterizada pela presença de espaços entre moitas, favorecendo o desenvolvimento de espécies herbáceas heliófilas de ampla distribuição geográfica.

Por outro lado, a condição arbustiva mais fechada favorece o desenvolvimento de trepadeiras e espécies típicas de sub-bosque pertencentes a diferentes famílias botânicas. Essa condição também ocorre nas áreas E10 e E6; entretanto, ambas não se agruparam nem apresentaram elevada similaridade em relação às demais áreas. Uma possível explicação para essa diferenciação está relacionada à floresta que sucede essas formações em direção ao continente. Na E10, a floresta apresenta maior desenvolvimento estrutural e florístico, enquanto na E6 o porte arbóreo é menor e a vegetação possui aspecto mais aberto, embora ocorram trechos estruturalmente semelhantes sob o ponto de vista fisionômico. Além disso, a proximidade da estação E6 com a foz do rio Doce, bem como a influência de áreas alagadas próximas à E10, constituem fatores ambientais que possivelmente contribuem para as diferenciações observadas entre essas comunidades. Apesar da hierarquia das espécies acompanhar as tendências de variação observadas ao longo do monitoramento, houve diminuição na taxa de cobertura da vegetação sobre as dunas (Figura 2B) dentro do Compartimento C, incluindo forte abrasão em E1. Apesar disso, os dados atuais não indicaram desmoronamentos pontuais (*Blowouts*) na duna frontal que permitissem o alcance das ondas nos trechos mais estabilizados, outrora documentado neste setor, com consequente desestruturação da duna semifixa onde desenvolve-se *Mitracarpus eichleri*.

Figura 3: Resultados espaço-temporais do valor de importância das principais espécies amostradas das formações vegetais Arbórea (AO), Arbustiva (AU), e Herbácea (HB) da Restinga monitorada no PMBA/Fest-UFES entre períodos Chuvoso Ano 1 (2018) a Chuvoso Ano 8 (2026) entre estações amostrais dos compartimentos da região costeira do Espírito Santo (A a F). Retângulo em Vermelho: Compartimento C; Retângulo em Verde: Compartimento B'. Diversidade florística de Shannon das formações vegetais entre estações amostrais (G). Para o novo escopo,vigente a partir de outubro de 2024 (Chuvoso Ano7), foram excluídas as análises da formação arbórea e da Estação Barra Nova (E4).




E6
Aspidosperma pyricollum
R. capixabensis
Guapira opposita
Myrsine guianensis
Eugenia astringens
Protium heptaphyllum
AO
Período chuvoso Ano 1
Período seco Ano 3
Período chuvoso Ano 5
Período chuvoso Ano 6
0 20 40 60 80 100 120 140
Protium heptaphyllum
Stylosanthes viscosa
Coccoloba alnifolia
Guapira pernambucensis
Allagoptera arenaria
AU
Período chuvoso Ano 1
Período seco Ano 3
Período seco Ano 4
Período seco Ano 5
Período chuvoso Ano 6
Período chuvoso ano 7
0 20 40 60 80 100 120 140
Mitracarpus eichleri
Ipomoea pes-caprae
Panicum racemosum
Ipomoea imperati
Cyperus pedunculatus
HB
Periodo chuvoso Ano 1
Periodo seco Ano 1
Periodo chuvoso Ano 3
Periodo chuvoso Ano 4
Periodo seco Ano 5
Periodo chuvoso Ano 6
Periodo seco Ano 7
Periodo chuvoso Ano 8
0 10 20 30 40 50 60 70
E
E7
Eugenia astringens
Erythroxylum sp1
Exellodendron gracile
Clusia hilariana
Protium heptaphyllum
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50
Waltheria indica
Allagoptera arenaria
Chamaecrista ramosa
Axonopus pressus
Guapira pernambucensis
Stylosanthes viscosa
0 20 40 60 80 100 120 140
Canavalia rosea
Blutaparon portulacoides
Ipomoea imperati
Ipomoea pes-caprae
Panicum racemosum
Cyperus pedunculatus
0 20 40 60 80 100 120
F
H'
3,5 3 2,5 2 1,5 1 0,5 0
E1 E3 E4 E6 E7 E10
H'
3 2,5 2 1,5 1 0,5 0
E1 E3 E4 E6 E7 E10
H'
3 2,5 2 1,5 1 0,5 0
E1 E3 E4 E6 E7 E10
G

Para o Ano 7, os valores de importância encontrados nos Compartimentos B' e C seguiram, no geral, a tendência encontrada nas avaliações dos anos anteriores para a formação arbustiva, com pequenas alterações. Porém, as mudanças marcantes observadas foram: a) um declínio acentuado na importância relativa de *Waltheria indica* na formação arbustiva em E7 em relação ao Ano 6 (Figura 3F); e b) incremento no valor de importância de *Coccoloba alnifolia* na formação arbustiva em E10 (Figura 3D). Na comunidade herbácea do Compartimento B', os dados obtidos no Ano 6 destacaram aumento dos valores de importância de *Cyperus pedunculatus* na REBio Comboios (E7), resultado associado com sua alta capacidade de colonização no sentido do mar, além da alta capacidade de propagação vegetativa, que permite seu domínio em períodos onde o lençol freático se encontra mais próximo da superfície ou mesmo aflora, em função de elevadas precipitações, que por sua vez, podem ocorrer mesmo em períodos considerados de seca (Figura 3F). Mesmo apresentando distorções pontuais ao longo do monitoramento, os dados deste setor indicaram estabilidade na hierarquia específica e respostas coerentes com a dinâmica de praia esperada e os aspectos relacionados a fenologia de seus componentes.

No Compartimento C (Figura 3A-D), espécies como *Ipomoea imperati* e *Panicum racemosum* também se sobressaíram pelas mudanças no valor de importância. *Ipomoea imperati*, apesar da redução suave neste parâmetro nas estações E1 e E3 no ano 8, apresentou tendência à normalização em relação ao primeiro ano de monitoramento, parecendo um aspecto natural da dinâmica desta espécie. Já *Panicum racemosum*, apresentou aumento acentuado do valor de importância em E1, ano 8, em relação ao ano anterior, recuperando sua cobertura apresentada no ano 1.

Em relação a *Scaevola plumieri*, uma espécie ameaçada de extinção, os valores de importância se aproximaram daqueles obtidos durante o Ano 1 em E1, provavelmente em função de sua fenologia, que em determinados períodos parte de sua população seca, onde estão as parcelas, aumentando ou diminuindo os valores estruturais em função dessa dinâmica, bem como também pode ser atribuído ao hábito subarbustivo, ocupando porções próximas à praia e eficientes na colonização de dunas, onde ocorre com distribuição agrupada. Para esta espécie, no ano 8 em E3, os resultados mostram que existe uma tendência no aumento do valor de importância no sentido de restabelecer as coberturas encontradas nos anos 1 e 3.

Para a formação arbustiva, foram verificadas alterações nos valores de importância das espécies (Figura 3A-F) em ambos os compartimentos C e B', não relacionadas aos contaminantes oriundos do MLD, mas em razão de aspectos inerentes a sua biologia. *Waltheria indica* apresentou diminuição nos valores estruturais, refletindo no seu valor de importância, fato esse que coincide com um período de estiagem prolongada e rebaixamento do lençol freático nas depressões entre os cordões arenosos (Figura 3F).

Nas formações arbustivas dos diferentes compartimentos há predomínio de *Allagoptera arenaria* (Arecaceae), espécie de comportamento clonal e de difícil interpretação quanto à definição de indivíduo. Para minimizar essa limitação metodológica, adotou-se o critério de considerar como um novo indivíduo aqueles agrupamentos separados por distância superior a 50 cm. Ainda assim, a estimativa de

densidade para essa espécie apresenta baixa precisão. Além disso, esses agrupamentos podem incluir ou excluir indivíduos das parcelas ao longo dos diferentes períodos de amostragem. Como se trata de uma espécie acaule, apenas a folhagem permanece exposta, condição que favorece sua inclusão ou exclusão nos levantamentos conforme a dinâmica fenológica observada em cada período. Em fases de maior senescência foliar ocorre redução significativa dos parâmetros fitossociológicos, especialmente da cobertura, refletindo diretamente nos valores de importância.

Entre as espécies de maior destaque também se encontra *Coccoloba alnifolia* (Polygonaceae), que apresenta intensa perda foliar em determinados períodos, reduzindo significativamente sua participação no parâmetro dominância. Situação semelhante é observada em *Chamaecrista flexuosa* (Fabaceae), espécie de pequeno porte, porém frequentemente associada a elevada densidade populacional. Em alguns períodos, essa espécie praticamente desaparece da área amostral, voltando posteriormente a se restabelecer.

Também devem ser considerados fatores ambientais que interferem nas análises sazonais. Alguns trechos sofrem erosão natural, porém tendem a apresentar rápida recuperação, como observado na REBio Comboios (E7). Em outros casos, o restabelecimento da antiga linha de praia demanda períodos mais prolongados ou mesmo não ocorre ao longo de vários anos, como registrado na APA Conceição da Barra (E1), onde grande parte da área foi carreada há mais de cinco anos e ainda não retomou a configuração observada nas primeiras análises. O efeito antrópico constitui outro fator relevante. Mesmo em áreas relativamente conservadas, como em E7, o trânsito de veículos ocasionalmente ultrapassa os limites das trilhas historicamente estabelecidas, favorecendo a eliminação de espécies presentes nas parcelas e possibilitando o estabelecimento de espécies oportunistas, incluindo aquelas consideradas exóticas ao ecossistema estudado.

Para o Ano 7, *Coccoloba alnifolia* mostrou recuperação desse parâmetro em relação ao Ano 6, cujo valor apresentou declínio em função de ajustes na amostragem, devido a adequações de disposição do intercepto de linha. A amostragem seguiu a metodologia de análise do primeiro ano de avaliação da estação E10 (Seco Ano 5), o que resultou na retomada dos valores de importância deste período (Figura 3D). Talora e Morellato (2000) classificam *C. alnifolia* como sendo semidecídua, com brotamento marcado entre os meses de novembro a maio, e com queda foliar entre os meses de junho a outubro, logo, este fator poderia agregar para mais ou menos no valor de importância. A Estação E10 segue apresentando índices de diversidade que se destacam das demais estações. Essa particularidade pode estar ligada à sua localização próxima ao Compartimento B'.

Até o período Seco do Ano 6, na formação arbórea, foi mantida a classificação das espécies mais importantes nos compartimentos C e B'. Entre elas, *Exellodendron gracile* se sobressaiu na estação E7, sendo esta notável por ser uma espécie ameaçada de extinção. Já *Protium heptaphyllum* foi amplamente encontrada em praticamente todas as estações como a espécie de maior valor de importância na comunidade vegetal, com exceção de E4 e E7.

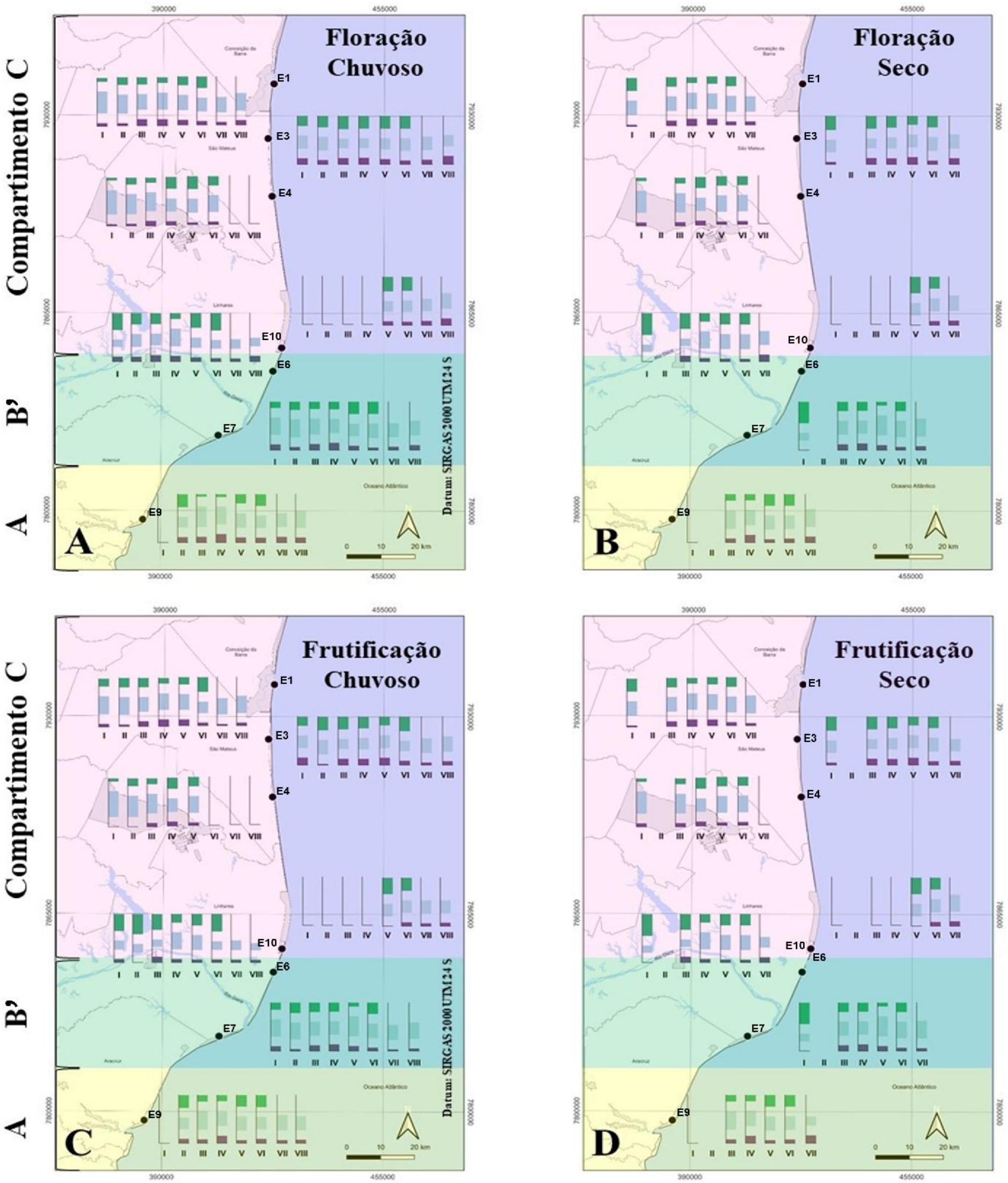
No Compartimento B', os resultados mais destacados são para as espécies como *Ipomoea imperati* e *Panicum racemosum* que tiveram forte incremento no valor de importância nos primeiros anos de

monitoramento em E7. Porém, no ano 8, estas espécies apresentaram decréscimo significativo no valor de importância nessa estação, sendo substituídas por *Blutaparon portulacoides* e *Canavalia rosea* as quais tiveram aumento expressivo.

As principais espécies nos dois compartimentos analisados mostraram variações dentro do intervalo de confiança (Figura 3A-F). É importante ressaltar que fatores como a proximidade da praia e a irregularidade das copas (representada pela diversidade de Shannon – Figura 3G) impactam a capacidade de capturar contaminantes transportados pelo aerossol marinho. Nessas situações, alterações no metabolismo são esperadas. Até o momento, não é possível confirmar se as mudanças estruturais observadas estão ligadas à contaminação proveniente do MLD, embora a contaminação na comunidade arbórea tenha sido detectada. No entanto, os efeitos dessa contaminação na organização da comunidade se desenvolvem lentamente e exigem estudos de longo prazo.

O crescimento vegetativo das espécies, sua fenologia, além das mudanças abióticas no ambiente ao longo dessas amostragens relacionadas ao clima, muito provavelmente influenciou na cobertura vegetal, sendo perceptível na amostragem das mesmas, mas de forma geral não descaracterizaram a fisionomia das formações. Para Talora e Morellato (2000), aspectos da fenologia em floresta atlântica de planície litorânea apresentam padrões sazonais menos acentuados do que aqueles observados em florestas semidecíduas, onde as fases fenológicas como floração e brotamento são altas na estação mais úmida do ano, e que estão associados à temperatura e comprimento do dia.

Figura 4: Amplitude fenológica das espécies chave avaliadas em cada formação vegetal encontrada nas estações amostrais durante os períodos chuvosos e secos nos Anos I (2018/2019), II (2019/2020), III (2020/2021), IV (2021/2022), V (2022/2023), VI (2023/2024), VII (2024/2025) e VIII (2025/2026) da vegetação de Restinga monitorada no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Dados não mostrados no Ano II referem-se ao período de interrupções devido ao COVID-19. Para o novo escopo, vigente a partir de outubro de 2024 (Chuvoso Ano7), foram excluídas as análises da formação arbórea e da Estação Barra Nova (E4).

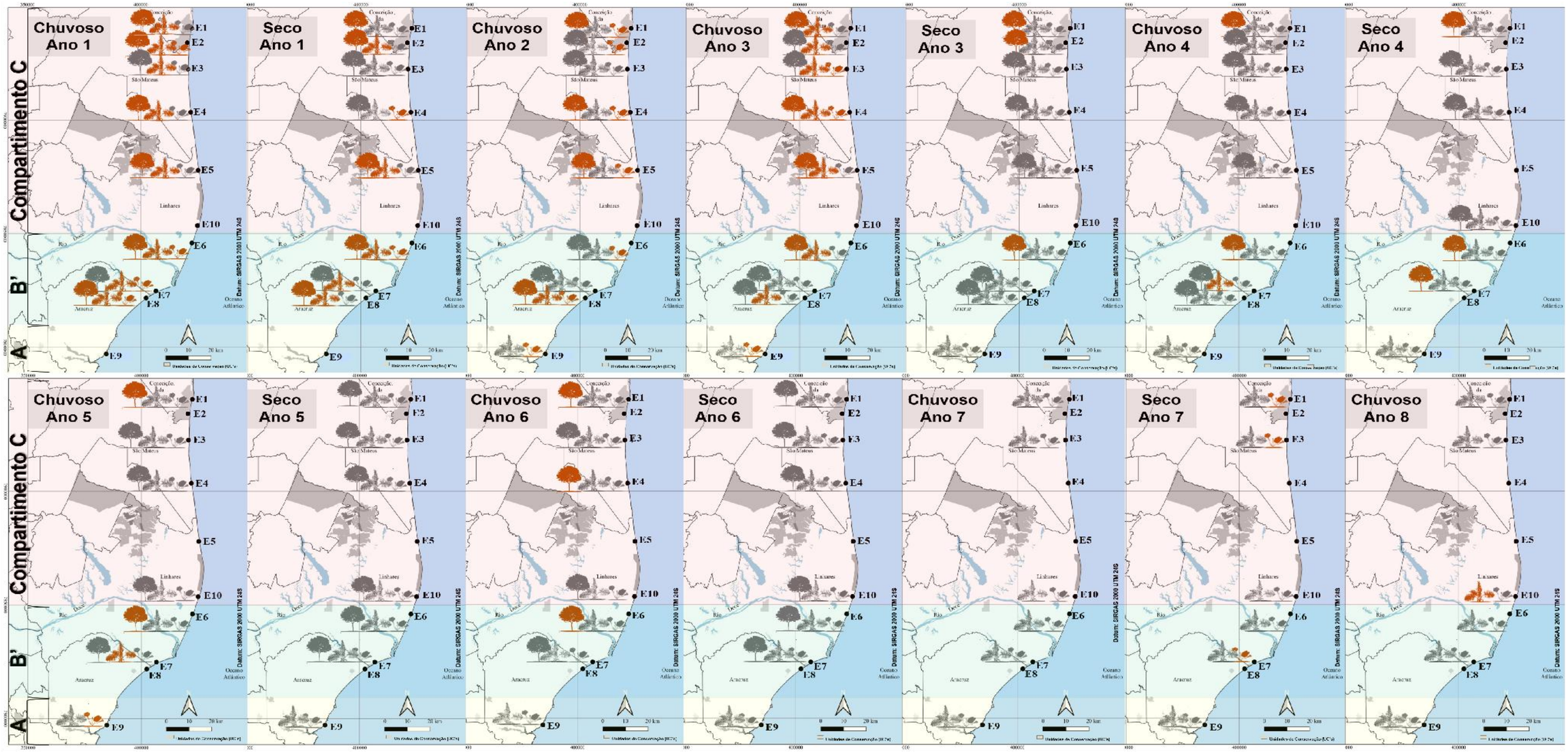


A fenologia reprodutiva das comunidades de restinga avaliadas apresentavam flutuações evidentes nos primeiros anos de monitoramento em todas as estações e para todos os compartimentos (Figura 4A-D), indicando possíveis falhas na sincronia das fenofases e no sucesso da polinização das plantas naquele tempo. Nos últimos quatro anos os padrões fenológicos para as formações avaliadas mostraram uma tendência estabilizada dos fenômenos, com exceção das fenofases no período seco (Figura 4B e Figura 4D). Para o período Seco do Ano 7, floração e frutificação apresentaram flutuações marcantes em relação aos anos 5 e 6, principalmente em E10, E6 e E9.

Florescimento e frutificação se mantiveram estáveis ao longo do período chuvoso nos últimos anos (Anos 5 a 8) para todas as estações em todos os compartimentos (Figura 4A e Figura 4C). Porém, em E10, foi observada tendência no aumento na formação arbustiva a partir do período chuvoso do Ano 8. Apesar disso, a constância desses eventos reprodutivos pode estar demonstrando sincronia no florescimento e manutenção da polinização ao longo do tempo e produção de frutos, especialmente por espécies zoocóricas. Para Talora e Morellato (2000), as vegetações de restinga parecem não exibir sazonalidade fenológica, comportamento distinto de outras formações vegetacionais na floresta tropical, corroborando com o aspecto geral encontrado para os processos fenológicos das áreas monitoradas.

As mudanças mais marcantes, contudo, ocorreram no período Seco do Ano 7, principalmente relacionadas à frutificação nos compartimentos B’ e C (Figura 4D), tanto para a formação arbustiva quanto herbácea. Para a floração, um padrão estável foi visualizado no compartimento C, mesmo ocorrendo um discreto crescimento na formação arbustiva (Figura 4B). O aumento na frutificação foi mais evidente na vegetação arbustiva no Ano 7 em relação ao ano anterior para a estação E10, enquanto em E9, E6 e E3 foram observados moderados decréscimos (Figura 4D). Apesar desses resultados, as taxas de floração e, sobretudo, frutificação no período seco estão coerentes com a manifestação fenológica encontrada para vegetações com baixa sazonalidade (TALORA e MORELLATO, 2000). Com base nas oscilações fenológicas observadas, é fundamental a continuidade do monitoramento das fenofases em conjunto com os atributos fisiológicos e a influência do MLD nas vegetações de restinga, aprofundando a relação dos contaminantes nos processos reprodutivos das plantas.

Figura 5: Alerta de Perigo Biológico para plantas herbáceas, arbustivas e arbóreas da Restinga monitorada pelo PMBA/Fest-UFES nos períodos Chuvoso Ano 1 (2018) a Chuvoso Ano 8 (2026). Para o novo escopo, vigente a partir de outubro de 2024 (Chuvoso Ano 7), foram excluídas as análises da formação arbórea e da Estação Barra Nova (E4).



A Figura 5 apresenta os resultados do indicador Vitalidade da vegetação de Restinga, integrando em mapas temáticos de períodos secos e chuvosos as categorias biológicas de Produtividade primária, Metabolismo primário, Estresse oxidativo e Reprodução, com o objetivo de identificar, em escala espacial e temporal, como essas comunidades vegetais respondem à presença de elementos químicos no ambiente. Essa abordagem integrada permite compreender, de forma mais aprofundada, os mecanismos biológicos responsivos à pressão ambiental, evidenciando como as plantas reagem à contaminação ao longo do gradiente espacial e sob diferentes condições sazonais.

Assim como em resultados já vistos anteriormente, manteve-se evidente a maior vulnerabilidade dos compartimentos B' e C, com destaque para respostas agudas e localizadas nas proximidades da Foz do rio Doce, especialmente em Cacimbas (E6) e na REBio Comboios (E7), persistentes até os períodos Chuvoso do Ano 6 e Seco do Ano 7, respectivamente. Também persistiram respostas crônicas e mais difusas na porção norte da área estudada, entre a APA de Conceição da Barra (E1) e Aldeia dos Cocos (E3), reforçando o padrão espacial de maior sensibilidade das estações ao norte da foz. Esse comportamento é coerente com a maior recorrência de acúmulo de metais como Mn, Zn, Cu, As e Co, bem como com os maiores sinais de estresse fisiológico e bioacumulação observados nessas regiões.

O padrão registrado no período Chuvoso do Ano 6 foi mais crítico em comparação ao período seco do mesmo ano. Contrariamente, para o Ano 7, o que se observa é o maior número de áreas classificadas em condição de "Perigo" no período Seco, com ocorrência de respostas concentradas principalmente nos compartimentos B' e C, com destaque para a APA Conceição da Barra (E1), Aldeia do Coco (E3) e REBio Comboios (E7). A retomada das condições de "Perigo" para a vitalidade da vegetação, com a inclusão dos dados do período seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8, pode ser associada principalmente à dinâmica abiótica do sistema, em especial às variações sazonais da Porcentagem de elementos acima da referência (PEAR) no sedimento.

No período Chuvoso do Ano 8, esse padrão geral de redução se mantém conforme o que já vem sendo observado desde o Ano 5, com ocorrência isolada de "Perigo" para a Vitalidade da vegetação arbustiva em Degredo(E10). A ausência de áreas extensas sob essa classificação continua reforçando a hipótese de transição para uma fase de maior estabilidade ecológica, ainda que persistam sinais residuais de vulnerabilidade em estações onde os resultados de impacto são recorrentes. Esse resultado pode estar associado também, em parte, à exclusão das atividades de monitoramento da vegetação arbórea, que até o Ano 6 apresentava impacto espacial recorrente, especialmente no período seco dos cinco primeiros anos, essa formação mostrou relação direta do acúmulo de contaminantes com a resposta biológica.

Apesar de o indicador integrado não ter apontado áreas críticas em períodos dos Anos 6 e 7, as estações localizadas ao norte da Foz do rio Doce, em especial a APA de Conceição da Barra (E1), permaneceram como pontos sensíveis, evidenciando a persistência de respostas negativas quando as categorias que compõem o indicador são avaliadas individualmente. Esse padrão, novamente confirmado na vegetação herbácea do período Seco do Ano 7, reforça a manutenção de impactos

crônicos e a não uniformidade do processo de recuperação ao longo do gradiente espacial, indicando que a resiliência do ecossistema ocorre de forma heterogênea entre os compartimentos.

Esse comportamento é consistente com o modelo de resposta não linear descrito por Scheffer *et al.* (2001), no qual o ecossistema apresenta relativa inércia frente à pressão ambiental até atingir um ponto crítico, a partir do qual ocorrem mudanças mais abruptas na sua estrutura e funcionamento. A manutenção de focos persistentes de impacto em estações específicas, como na porção norte do monitoramento e em áreas de transição costeira, indica, por sua vez, que diferentes porções do sistema podem refletir recuperação heterogênea ao longo da costa.

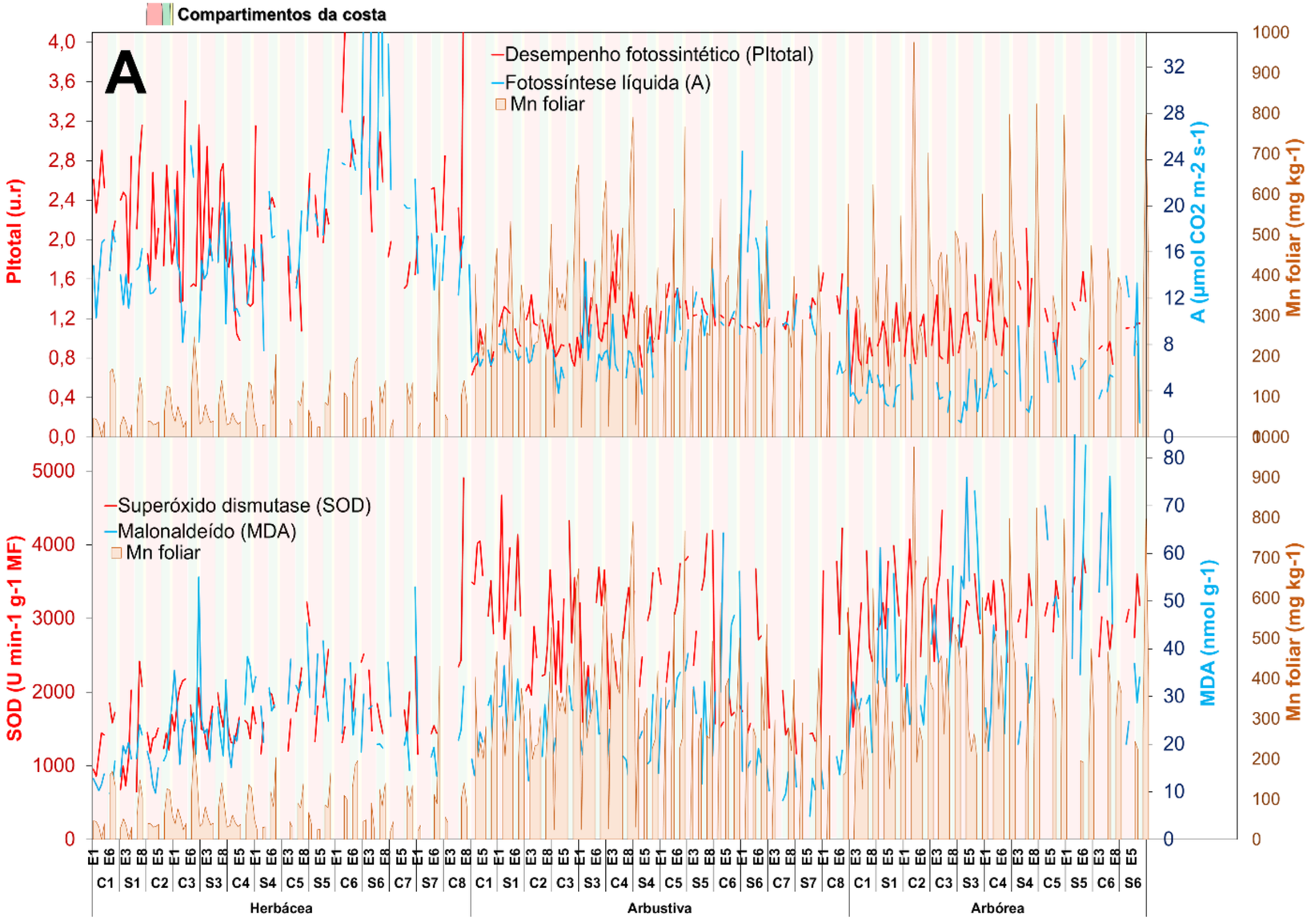
Cacimbas, no Compartimento B', por sua posição de transição entre compartimentos e localização que permite exposição mais imediata ao Material Ligado ao Desastre (MLD), continua a demonstrar elevada sensibilidade para os parâmetros da categoria Produtividade primária, tanto na formação herbácea quanto arbustiva.

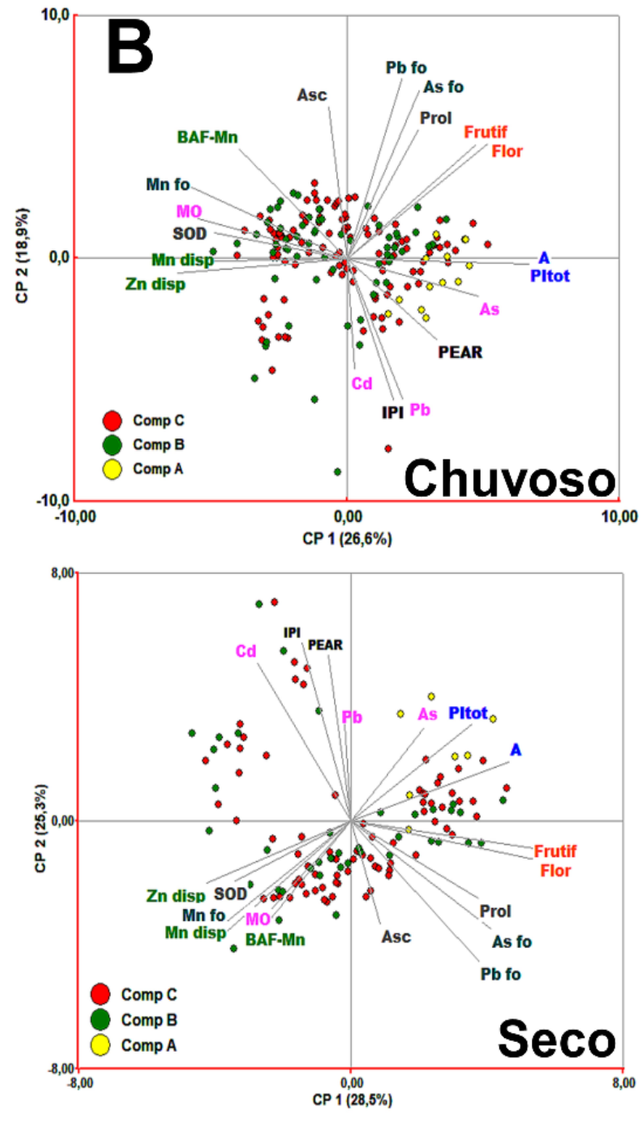
A vegetação herbácea, mais exposta aos efeitos da dinâmica marinha, mostrou, com a inclusão dos períodos seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8, maior resiliência em resposta ao aporte do MLD veiculado pelo spray marinho e aos eventos de inundação associados ao avanço do mar. Suas características morfológicas e estratégias adaptativas, como rápido crescimento e fenologia flexível, conferem a essa formação maior capacidade e rapidez de resposta e recuperação, o que pode explicar a menor recorrência de áreas classificadas em "Perigo" ao longo de todo o monitoramento, mesmo em regiões mais expostas. Os resultados que vinham sendo encontrados desde o Ano 7 podem indicar o início de uma transição entre fases de impacto agudo e sinais iniciais de resiliência ecológica, ainda que persistam vulnerabilidades na resposta biológica.

Diferentemente do que foi sugerido anteriormente para o período chuvoso do Ano 7, os dados atuais indicam que a resposta molecular das plantas da formação herbácea não é uniformemente reduzida, tanto para genes relacionados à proteção frente ao excesso de elementos minerais, como metalotioneínas, quanto para a enzima fitoquelatina sintase, envolvida na síntese de compostos quelantes de metais. De modo geral, as metalotioneínas (MT1 e MT2) apresentam expressão baixa a intermediária, com leve aumento na vegetação herbácea de Cacimbas (E6) em relação à APA Conceição da Barra (E1), enquanto a metalotioneína 3 mantém níveis reduzidos e pouca variação. Já para a expressão gênica da enzima fitoquelatina sintase, substancialmente maior em Cacimbas, pode-se sugerir maior ativação de mecanismos de quelação e compartimentalização de metais. Esse padrão reforça, em parte, a interpretação anterior de menor intensidade de estresse na formação herbácea, uma vez que não se observam picos expressivos de indução gênica como aqueles associados a respostas mais agudas. Esses resultados evidenciam a relação entre a expressão de genes associados à quelação de metais e a categoria Produtividade primária. A redução na expressão gênica observada pode sinalizar diminuição do estresse oxidativo, em consonância com o aumento da performance fotossintética da vegetação, refletido pelo incremento do Índice de desempenho fotossintético (PItotal). O aumento do PItotal esteve associado à menor expressão de MT1 (r = -0,69), MT2 (r = -0,78), MT3 (r

= -0,60) e da fitoquelatina sintase, PCS (r = -0,60). Relação semelhante também foi observada para a fotossíntese líquida, sobretudo com PCS (r = -0,90). Esse padrão sugere maior desempenho fotossintético em condições de menor ativação desses mecanismos de defesa.

Figura 6: Variação espaço-temporal de variáveis de Produtividade primária e Estresse oxidativo em resposta à concentração de manganês **(A)** para períodos CHUVOSOS (C) e SECOS (S) do Ano 1 (2019) ao Ano 8 (2026). Análise de Componentes Principais (PCA) entre variáveis abióticas e biológicas de resposta da vitalidade **(B)**: Floração (Flor), Frutificação (Frutif), Fotossíntese líquida (*A*), Índice de desempenho fotossintético (PI_{total}), atividade da Superóxido dismutase (SOD), teores de Malonaldeído (MDA), Ascorbato (Asc) e Prolina (Prol), concentração de elementos minerais no sedimento e nas folhas (fo), Fator de bioacumulação (BAF), Índice Integrado de Poluição (IPI) e Porcentagem de elementos acima da referência (PEAR). Para o novo escopo, vigente a partir de outubro de 2024 (Chuvoso Ano7), foram excluídas as análises da formação arbórea e da Estação Barra Nova (E4).





O monitoramento da vegetação de Restinga revelou que a contaminação por metais, especialmente o Manganês (Mn) (Figura 6A), é o fator determinante para o declínio da saúde vegetal nos compartimentos mais atingidos pelo Material Ligado ao Desastre (MLD). A Produtividade primária permanece muito sensível ao acúmulo de Mn, com correlação negativa com PItot e A no período Seco do Ano 7 (r = –0,59 e r = –0,47, respectivamente), padrão que se manteve no também no período Chuvoso do Ano 8 (r = –0,45 e r = –0,55). Já o Estresse oxidativo apresenta comportamento inverso, com a atividade da enzima dismutase do superóxido (SOD) mantendo correlação positiva com Mn foliar no período Seco do Ano 7 (r = 0,50) e no Chuvoso do Ano 8 (r = 0,44), indicando que o aumento do Mn foliar permanece associado à ativação da resposta antioxidante, o que sugere a manutenção de estresse oxidativo ao longo do período analisado.

Com a inclusão dos resultados de bioacumulação do período Seco 7 e do Chuvoso 8, observa-se que o acúmulo de Mn persiste e se intensifica principalmente nas estações Degredo (E10), Cacimbas (E6) e REBio Comboios (E7), situadas nos compartimentos C e B′. Algo semelhante ocorre para o cobre, cujo acúmulo aumentou na estação chuvosa. Entre as variáveis biológicas avaliadas, a fotossíntese líquida (A), componente da categoria Produtividade primária foi a variável que apresentou as correlações mais altas com os fatores de bioacumulação de Mn e de Cu, destacando-se em termos de resposta fisiológica ao acúmulo desses metais. De maneira mais ampla, as diferenças entre estações se alinham aos padrões históricos: áreas como Degredo e Cacimbas mantêm os níveis mais elevados de contaminação e de estresse, enquanto as estações menos afetadas apresentam bioacumulação e respostas fisiológicas mais moderadas.

A partir da análise espacial por formação vegetal, fica evidente que o manganês continua a ser o principal elemento associado ao declínio fisiológico na restinga, mas a presença de outros metais não deve ser ignorada. Nas formações arbustivas dos compartimentos C e B′, em especial nas áreas de Cacimbas (E6), Degredo (E10) e REBio Comboios (E7), observam-se altos valores de bioacumulação de Arsênio, Zinco, Chumbo e Cádmio, sugerindo que esses elementos também contribuem para a queda de produtividade. A formação herbácea mantém padrões semelhantes ao longo do monitoramento, com produtividade reduzida tanto em E6 quanto em E10, mas a análise ressalta que essas comunidades são particularmente sensíveis ao acúmulo concomitante de Mn, Cu e dos quatro elementos químicos acima citados.

Já para a produção de Metabólitos primários, a produção de ascorbato (Asc) vem se mantendo em níveis mais moderados após o pico observado no Ano 6, tanto para herbáceas quanto arbustivas, período que havia sido marcado pelos maiores valores desde o início do monitoramento. No entanto, não foram observadas relações significativas da produção de metabólitos primários com a concentração dos elementos minerais no período chuvoso do Ano 7. A reposição de Asc não parece responder diretamente à carga total de metais, permanecendo mais associada ao estado fisiológico geral das plantas e à disponibilidade de recursos observada ao longo do monitoramento. Esse padrão sugere uma recuperação metabólica lenta e não linear, acompanhada, possivelmente, por ajustes em outras rotas antioxidantes e de detoxificação. As relações mais relevantes envolveram aumento nos

teores de lama associado a redução na síntese de Prolina (r=-0,51). A correlação negativa entre Prolina (Prol) e teor de lama sugere que sedimentos mais finos e ricos em matéria orgânica podem reter metais e modular sua biodisponibilidade imediata, enquanto parte importante desses elementos persiste no ambiente por ter chegado associada a óxidos e oxi-hidróxidos de Ferro, que funcionam como fase de sorção e liberam metais gradualmente à medida que passam por dissolução redutiva e mudanças de cristalinidade em condições estuarinas (ZHANG *et al.*, 2014; QUEIROZ *et al.*, 2021). Para a Prol, o padrão mais consistente no período seco esteve menos ligado ao substrato e mais às associações com a concentração foliar de metais. No período Seco do Ano 7, observaram-se correlações positivas com Arsênio foliar (r = 0,49) e Chumbo foliar (r = 0,55), além de associação positiva com o Asc (r = 0,45), sugerindo ajuste metabólico coordenado sob estresse, enquanto a relação com Cádmio foi negativa (r = –0,46). Assim, como já observado ao longo do monitoramento, a mobilização favorecida no período chuvoso se reflete em respostas biológicas mais perceptíveis posteriormente, no período seco, sem implicar resposta fisiológica imediata ao momento do aporte.

Ao longo do monitoramento, as tendências periódicas da reprodução das comunidades vêm sendo associadas ao acúmulo de Al e à presença de lama. Na atualização mais recente, porém, as relações com Al foram mais discretas, com correlação de r = -0,17 para floração e r = -0,07 para frutificação, enquanto a associação com lama se manteve mais evidente (r = -0,47 para ambas as fenofases), indicando que esse componente do substrato continua exercendo papel mais consistente sobre a variação reprodutiva. A partir do período Seco do Ano 3, foi observado o prolongamento da floração da comunidade herbácea, divergindo do padrão encontrado no início do monitoramento. Não houve indícios vegetativos de perda foliar no período seco, acompanhando o padrão verificado no período chuvoso. As taxas de florescimento encontradas no Compartimento C, setor onde as alterações fenológicas foram melhor percebidas, ainda não são capazes de evidenciar indícios de declínio da comunidade. No Seco do Ano 7 e no Chuvoso do Ano 8, esse comportamento sazonal também foi acompanhado pelos parâmetros metabólicos, com maior associação ao eixo reprodutivo no período chuvoso e menor expressão no período seco, sugerindo maior exigência fisiológica nos momentos de maior atividade fenológica.

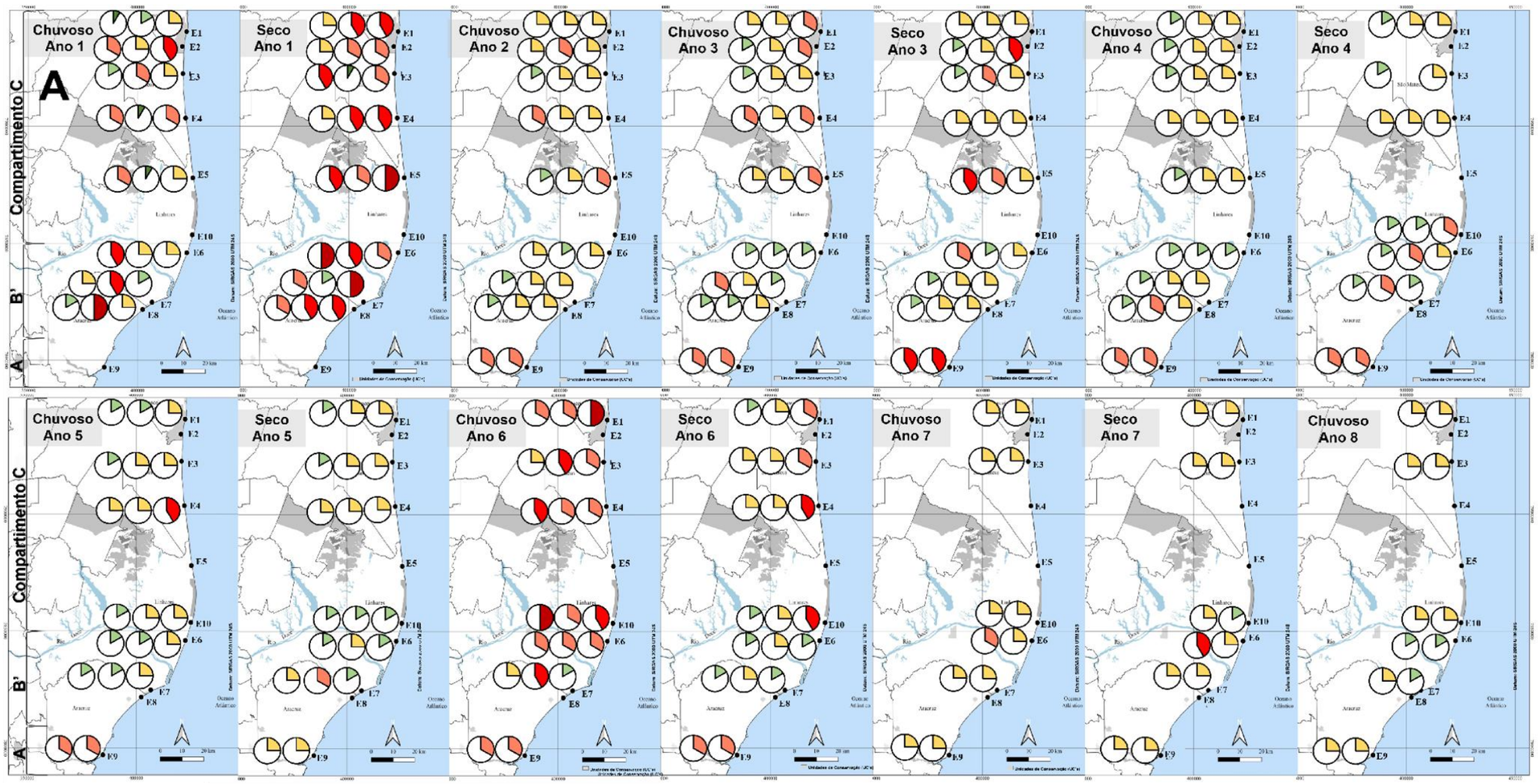
Se confirma também o impacto de alguns elementos como As, Pb, Mn, Sn e Al no sedimento, bem como biacúmulos de V e Cu sobre os efeitos genotóxicos na vegetação, acarretando aumentos na fragmentação do DNA de espécies herbáceas A análise de genotoxicidade das espécies *Canavalia rosea* e *Ipomoea imperati* revelou variação nos danos ao DNA entre os períodos avaliados, com um padrão mais evidente de variação temporal do que espacial. No período chuvoso do Ano 7, observou-se maior amplitude nos valores de danos ao DNA entre as estações, com destaque para a estação localizada na REBio Comboios (E7), no compartimento B', que apresentou os maiores níveis de fragmentação do material genético em comparação às demais. Esse resultado está em consonância com o padrão anteriormente observado, sugerindo maior exposição a agentes genotóxicos ou maior sensibilidade fisiológica nesse período.

No entanto, no período Seco do Ano 7, embora os valores de danos ao DNA permaneçam elevados, a variação entre as estações se mostra mais homogênea. Uma evolução dessa homogeneidade é percebida já no período chuvoso do Ano 8, no qual verifica-se uma redução geral nos níveis de danos ao DNA, também com menor variação entre as estações, não sendo observado aumento significativo ou discrepante em nenhuma estação amostral. Este resultado ainda está de acordo com as situações nas quais foi verificado aumento da performance fotossintética, estando em consonância com a redução do dano ao DNA (r = -0,53).

De forma geral, embora os metais presentes no ambiente possam induzir a produção direta e indireta de espécies reativas de oxigênio (EROs), além de favorecer a formação de eletrófilos e adutos (moléculas reativas ligadas ao DNA) que promovem a oxidação do DNA e a instabilidade cromossômica, os resultados atuais não evidenciam um padrão espacial consistente de genotoxicidade. A resposta observada pode estar mais associada à variabilidade temporal e às condições ambientais, como regime hídrico e possíveis alterações na biodisponibilidade de contaminantes, do que a um gradiente espacial de impacto.

Apesar dos resultados das respostas da vitalidade da vegetação terem se confirmado desde o Ano 5 até o período Chuvoso do Ano 7, foram confirmadas algumas variações sazonais com o acréscimo dos resultados do monitoramento durante os períodos Seco do Ano 7 e Chuvoso do Ano 8. Essas variações estão diretamente relacionadas à distribuição de elementos minerais no sedimento, especialmente Mn e Zn, bem como sua bioacumulação, além dos teores de lama e matéria orgânica. Perduram, como já visto no histórico do monitoramento da vegetação, o impacto associado ao perfil funcional, estrutural e reprodutivo da vegetação da Restinga, especialmente ao Compartimento B'. Especial destaque se deu à formação arbórea como sendo historicamente comprometida ao longo do monitoramento, o que limita a continuidade da interpretação sobre a sua trajetória de recuperação ou impacto. Ainda assim, a análise temporal dos dados disponíveis para herbáceas e arbustivas indica que a vegetação de Restinga como um todo não atingiu estabilidade em suas respostas, embora uma tendência de melhora tenha sido observada entre o Ano 5 e o Ano 7 do monitoramento. Os resultados corroboram a influência dos elementos As, Pb, Al, Mn e Zn, afetando significativamente a Vitalidade de espécies herbáceas e arbustivas (Figura 6B). A inclusão dos dados dos períodos seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8, embora reforce a vulnerabilidade do ecossistema à presença contínua de metais, continua a evidenciar flutuações nas categorias biológicas, sinalizando que os efeitos da contaminação ainda se manifestam de forma heterogênea entre os compartimentos e formações vegetais. Esses resultados confirmam as proposições por Magnago *et al.* (2013) e Lourenço Jr. *et al*. (2021), que descrevem esse ecossistema formado por um conjunto de comunidades distintas, com diferentes estruturas influenciadas principalmente pelas variações no lençol freático e composição de nutrientes do solo.

Figura 7: Contaminação de áreas de Restinga monitoradas ao longo de suas formações arbórea, arbustiva e herbácea, utilizando como referência os valores pré-rompimento (EIA-Nutripetro - PSG, 2013), nos períodos Chuvoso Ano 1 (2018) a Chuvoso Ano 8 (2026) no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Porcentagem de Elementos Acima da Referência – PEAR **(A)**; Índice Integrado de Poluição – IPI **(B)**; Análise de Componentes Principais – PCA – entre variáveis abióticas **(C)** nos diferentes Compartimentos da região costeira do Espírito Santo. Para o novo escopo, vigente a partir de outubro de 2024 (Chuvoso Ano7), foram excluídas as análises da formação arbórea e da Estação Barra Nova (E4).

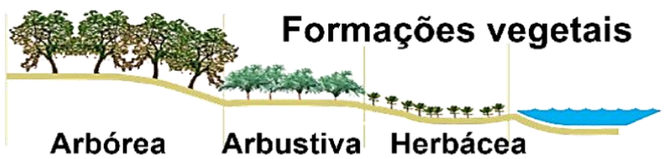


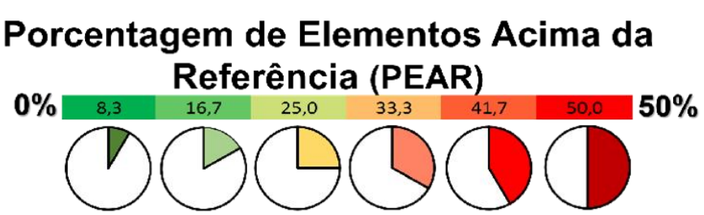
RESTINGA

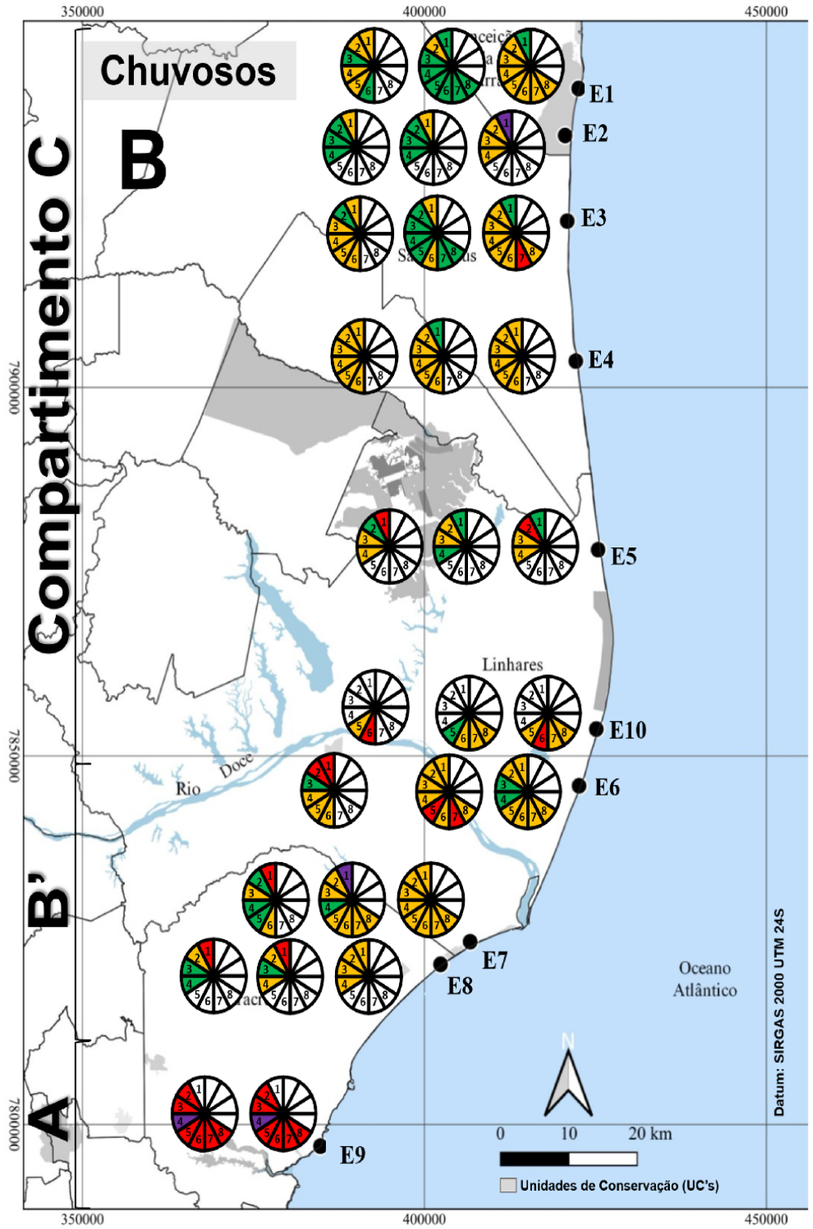
Valores de Referência

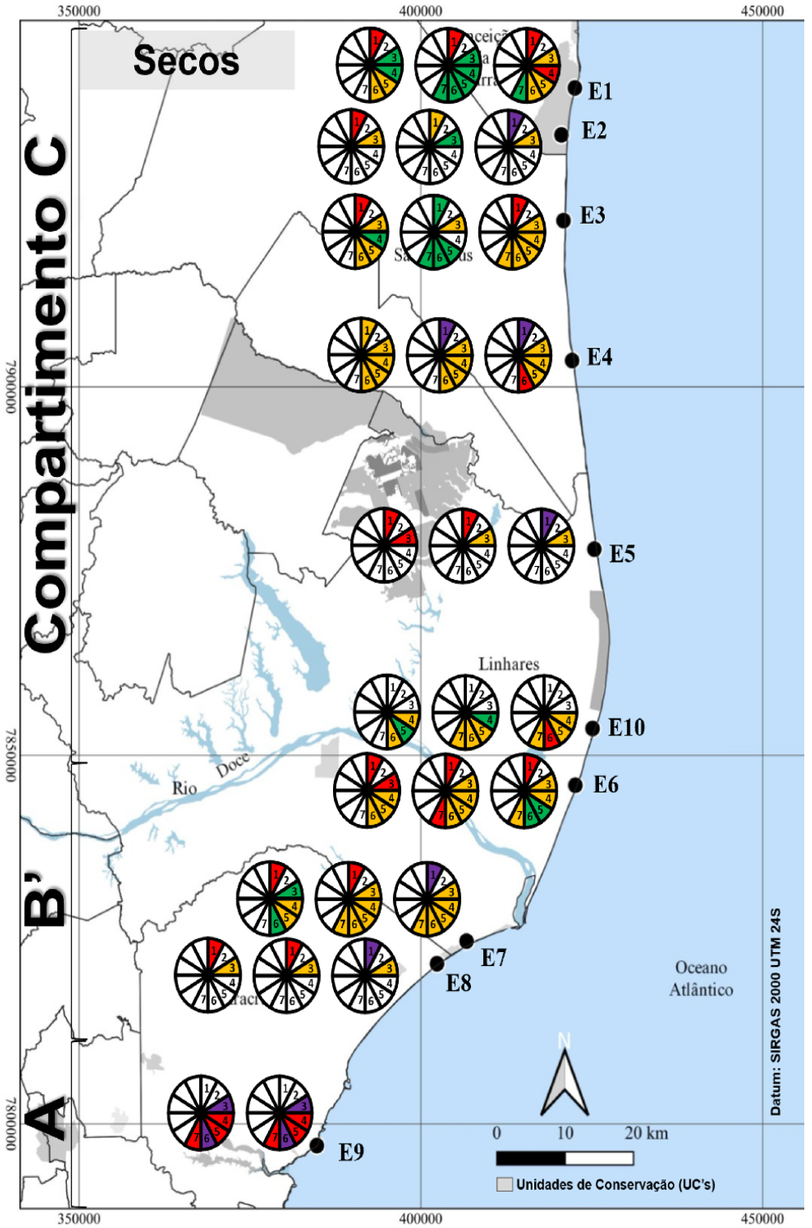
EIA- Nutripetro (2013) - sedimento

As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn, Al







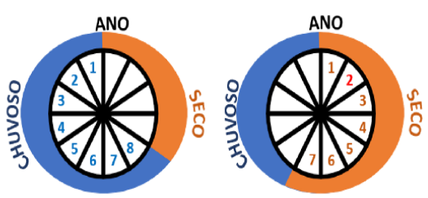


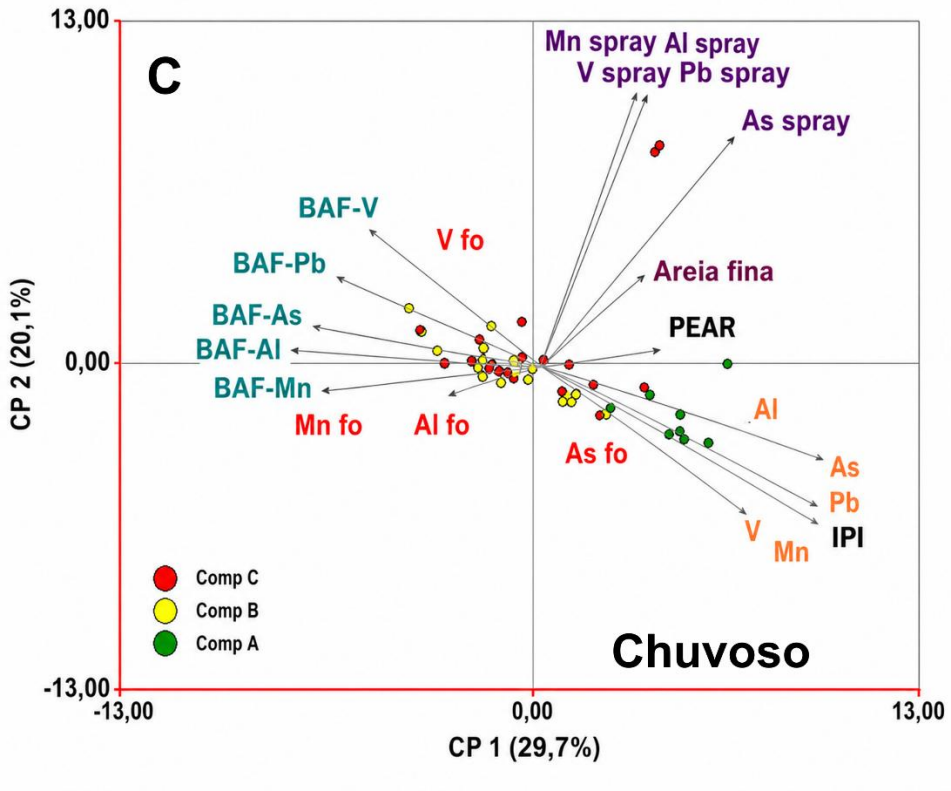
Índice integrado de poluição (IPI)

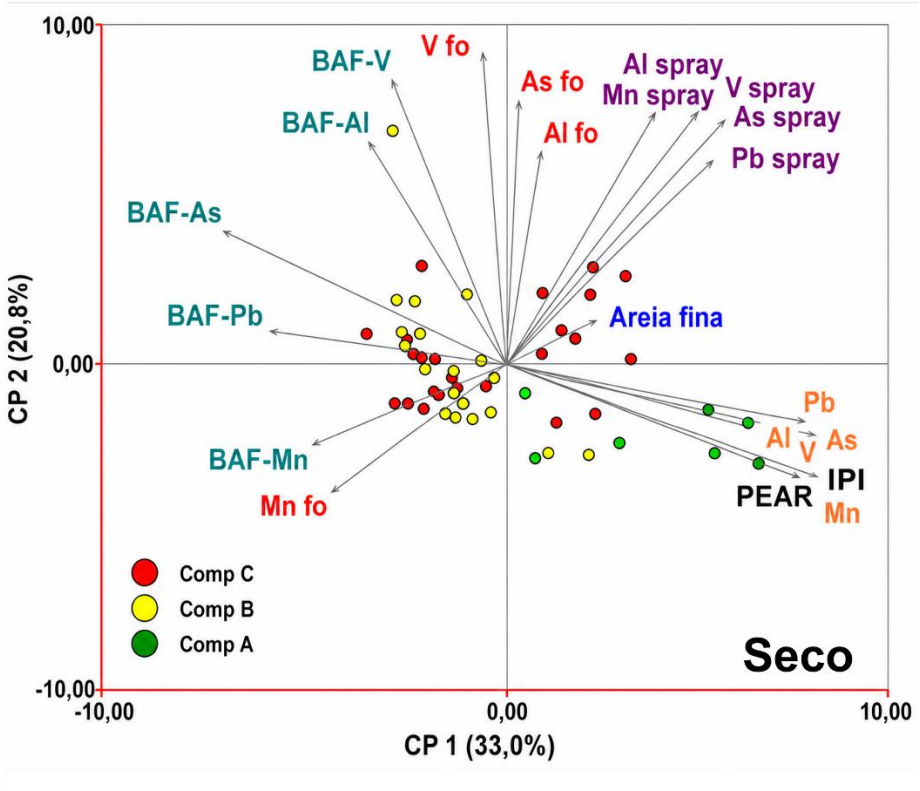
Nível de Poluição:

- Baixo
- Moderado
- Alto
- Extremamente alto

Períodos:




C
Mn spray Al spray
V spray Pb spray
As spray
BAF-V
V fo
BAF-Pb
Areia fina
BAF-As
PEAR
BAF-Al
BAF-Mn
Al
Mn fo
Al fo
As fo
As
Pb
V
Mn
IPI
Comp C
Comp B
Comp A
Chuvoso
13,00
0,00
-13,00
-13,00
0,00
13,00
CP 2 (20,1%)
CP 1 (29,7%)


BAF-V
V fo
As fo
Al spray
Mn spray
V spray
As spray
BAF-Al
Al fo
Pb spray
BAF-As
BAF-Pb
Areia fina
Pb
Al
As
V
BAF-Mn
IPI
PEAR
Mn
Mn fo
Comp C
Comp B
Comp A
Seco
10,00
0,00
-10,00
-10,00
0,00
10,00
CP 2 (20,8%)
CP 1 (33,0%)

Os resultados do monitoramento obtidos pelo PMBA/Fest-UFES evidenciaram que o indicador de Vitalidade da vegetação responde de forma sensível, integrada e espacialmente heterogênea à dinâmica de contaminação por metais e metaloides ao longo do gradiente costeiro da Restinga. Para a análise da Porcentagem de Elementos Acima da Referência (PEAR) (Figura 7A) no sedimento, observou-se uma melhora geral do Ano 7 em comparação ao Ano 6, tanto no período Seco quanto no Chuvoso. Isso sugere uma possível tendência de redução da pressão por contaminação nos sedimentos, o que pode refletir processos de atenuação natural, redistribuição ou ainda um menor aporte recente de elementos para as áreas monitoradas. A exceção continua sendo a vegetação de Cacimbas (E6), representativa do compartimento B', tanto para herbáceas quanto para arbustivas. No Período Seco do Ano 7 (2025) foi observado um aumento do número de elementos acima da referência nesta estação amostral, tanto no sedimento sob a vegetação herbácea quanto arbustiva, quando comparado ao mesmo período do Ano anterior. Diferentemente, no período Chuvoso do Ano 8 (2026), o que se observou foi uma redução do PEAR para o sedimento de Cacimbas em relação aos anos anteriores, e nas demais estações uma distribuição semelhante ao observado no período Seco do Ano 7. Essa área mantém características de maior vulnerabilidade ou retenção de contaminantes, distinguindo-se do padrão observado nas demais estações ao norte do rio Doce.

Com a adição dos períodos Seco do Ano 7 e Chuvoso do Ano 8, o que se observou para o Índice Integrado de Poluição (IPI) (Figura 7B) no solo foi uma tendência de melhora ou manutenção dos valores do índice principalmente no período chuvoso do Ano 8 comparado ao mesmo período do ano anterior, com especial destaque para a redução do IPI no solo sob as herbáceas de Aldeia do Coco (E3), no compartimento C, e sob as arbustivas de Cacimbas (E6), representante do compartimento B'.

Já na comparação entre os períodos secos, o resultado que novamente chama atenção é o da piora do valor do índice tanto em herbáceas quanto arbustivas de Cacimbas (E6), no compartimento B'. Espacialmente, duas estações representantes do compartimento C, APA Conceição da Barra (E1) e Degredo (E10), e a estação Mar Azul (E9), representativa do compartimento A, mostraram redução no valor do índice para o sedimento sob as herbáceas. Esta última estação amostral ainda apresentou o mesmo perfil de melhora no sedimento sob as arbustivas, quando comparado ao período Seco do Ano 6.

A melhora observada no período chuvoso do Ano 8 em parte das estações sugere um processo de atenuação, possivelmente associado à diluição sazonal, redistribuição sedimentar e menor permanência superficial dos elementos no sedimento. Já a persistência da contaminação como foi observado em áreas como Cacimbas (E6) indica que o sistema ainda apresenta fontes contínuas ou remobilização recorrente de contaminantes, influenciando a estabilização plena da qualidade ambiental local.

Os resultados do Seco do Ano 7 e do Chuvoso do Ano 8 reforçam a tendência de redução da pressão geral de contaminação no sedimento em parte das áreas monitoradas, e a matriz de correlação confirma esse padrão ao mostrar que as associações entre os índices integradores e os fatores de

bioacumulação permanecem, em geral, abaixo de 0,50. No conjunto atual, o IPI manteve associação com BAF-Mn (r = 0,33) e BAF-Pb (r = 0,34), enquanto o PEAR se correlacionou com BAF-Cu (r = 0,31) e, de forma mais evidente, com BAF-Pb (r = 0,40). Isso sugere que, embora a pressão do sedimento sobre os parâmetros de vitalidade tenha se reduzido, parte desse sinal ainda alcança os tecidos vegetais. Ao mesmo tempo, algumas relações seguem mais fortes, como IPI com Cd (r = 0,88) e PEAR com Pb (r = 0,59), indicando que esse gradiente de contaminação não desaparece de forma uniforme e pode permanecer de modo mais latente, variando conforme as condições ambientais e a dinâmica do sedimento.

Os resultados contemplando até o período chuvoso do Ano 8 corroboram o padrão que vinha sendo observado tanto para a Porcentagem de elementos acima da referência quanto para o Índice de poluição, nos quais há o indicativo do período seco como o mais crítico. Os dados da morfodinâmica e geoquímica das praias corroboram diretamente os padrões observados no ecossistema de Restinga até o momento. Os compartimentos B' e C, especialmente nas áreas monitoradas próximas à foz do rio Doce, apresentam maior mobilidade do sedimento, maior influência das cargas fluviais sazonais e maior deposição de sedimentos finos e lama, o que favorece a retenção de metais e sua persistência no ambiente. Esse padrão sustenta os elevados valores de IPI, PEAR e bioacumulação registrados nas formações herbácea e arbustiva, bem como as respostas ecofisiológicas crônicas observadas nessas áreas. Adicionalmente, os processos erosivos intensos registrados nas adjacências da foz e ao norte reforçam a hipótese de remobilização contínua de sedimentos contaminados, contribuindo para a manutenção dos impactos sobre a vegetação ao longo da série histórica.

Essa interpretação também é sustentada pelos dados globais de granulometria. No período Chuvoso do Ano 8, a fração fina do sedimento manteve associação positiva com variáveis ligadas à retenção e à transferência de metais, como a correlação entre argila e lama com Zn disp (r = 0,92 e 0,84), MO (r = 0,79 e 0,69) e com os fatores de bioacumulação de As (r = 0,81 e 0,69), Mn (r = 0,55 e 0,31) e Ni (r = 0,51 e 0,40). No período Seco do Ano 7, esse padrão permaneceu e se mostrou mais evidente em parte das variáveis, com argila e lama associadas a Mn disp (r = 0,71 e 0,70), Zn disp (r = 0,83 e 0,86) e aos BAFs de As (r = 0,74 e 0,73), Ni (r = 0,76 e 0,75) e Pb (r = 0,64 e 0,52). Esses resultados complementam a tendência observada para os compartimentos B' e C, ao indicar que a maior presença de sedimentos finos continua favorecendo a retenção e a persistência dos contaminantes no sistema.

A vegetação herbácea e arbustiva, situada nas áreas mais próximas à linha de costa, apresenta elevada exposição às condições meteoceanográficas, o que intensifica a deposição de aerossóis marinhos nessas zonas. Com a incorporação dos resultados referentes ao período Seco do Ano 7 e ao período Chuvoso do Ano 8, observou-se importante relação dos aerossóis com a acumulação de As, Cr, Fe, Mn, Pb e V nos tecidos foliares (Figura 7C). No período Chuvoso do Ano 8, esse padrão foi mais evidente, com correlações entre As spray e As foliar (r = 0,80), As spray e Cr foliar (r = 0,59), Fe spray e Fe foliar (r = 0,90), além de associações entre Cd spray e Pb foliar (r = 0,75). No período Seco do Ano 7, essas relações também permaneceram presentes, com destaque para As spray e As foliar (r = 0,41), Cd spray e Pb foliar (r = 0,78), Fe spray e Fe foliar (r = 0,68) e Pb spray e Fe foliar (r = 0,71).

O Fator de Bioacumulação (BAF) geral evidenciou acúmulo expressivo de Zn, Mn e Cu, mas também Co especificamente nas espécies arbustivas durante o período Seco do Ano 7, sendo que, do ponto de vista estatístico, a associação com os teores de matéria orgânica (MO) e com a presença de lama foi mais clara para Mn, com BAF-Mn correlacionado à MO (r = 0,41) e à lama (r = 0,44) no Seco do Ano 7, padrão que se manteve no Chuvoso do Ano 8 para MO (r = 0,53). Solos com maiores concentrações de MO e frações finas (Yu *et al.*, 2023), indicativas de maior teor de lama, tendem a apresentar maior capacidade de adsorção e retenção de metais devido à elevada área superficial e à maior capacidade de troca catiônica e, consequentemente, favorecer a retenção de elementos minerais nas raízes, bem como sua absorção e posterior translocação para a parte aérea, o que ajuda a explicar os maiores teores observados em solo e folha, conforme observado ao longo do Compartimento C, especialmente para Mn, Zn, Cu e As.

Verificou-se ainda que o acúmulo de Zn e Mn permaneceu ao longo de toda a faixa costeira, com expressão mais localizada em estações do compartimento C, especialmente em Aldeia do Coco (E3) e Degredo (E10). Nas análises desse compartimento, o Mn foliar manteve associação com a matéria orgânica (r = 0,94), com a argila (r = 0,70) e com o BAF-Mn (r = 0,94), enquanto o Zn foliar acompanhou fortemente o BAF-Zn (r = 0,99). Em conjunto, esses resultados indicam que a permanência desses elementos continua ligada à retenção em sedimentos finos e à sua transferência para a vegetação.

Observou-se uma relação direta entre a granulometria das praias e a distribuição dos metais no compartimento C. As frações mais finas, sobretudo argila, silte e lama, associadas à matéria orgânica, concentraram as relações mais consistentes com a retenção e a transferência de metais. No Chuvoso do Ano 8, a matéria orgânica e a argila acompanharam o Zn disponível (r = 0,92 e r = 0,93) e também o BAF-As (r = 0,89 e r = 0,77), enquanto o silte se associou mais claramente ao Fe foliar (r = 0,97). As frações mais finas, especialmente a lama (silte + argila), apresentaram maior capacidade de retenção de metais, em função da maior área superficial específica e do maior teor de matéria orgânica, fatores que favorecem processos de adsorção, complexação e troca iônica. Em menor intensidade, as areias finas também contribuíram para a concentração desses elementos, enquanto as areias grossas mostraram menor associação, sugerindo efeito de diluição mineral e menor capacidade de retenção. Esses resultados reforçam que a granulometria e o teor de matéria orgânica são fatores determinantes na distribuição e no acúmulo de metais no ambiente costeiro (El-SHARKAWY *et al.*, 2025).

Corroborando o que vem sendo observado com o monitoramento, maiores acúmulos de metal(oides) em frutos e sementes de espécies de Restinga continuam associados ao aumento dos teores de matéria orgânica e das concentrações de metais no sedimento. No Seco do Ano 7, esse padrão foi mais evidente para Mn em frutos, associado à matéria orgânica (r = 0,89), ao Cr no sedimento (r = 0,73) e ao Mn disponível (r = 0,71), além de Cr em frutos, relacionado a Cd (r = 0,85) e à lama (r = 0,62). No Chuvoso do Ano 8, por sua vez, o padrão passou a refletir mais diretamente a contribuição do acúmulo foliar, com V em frutos associado ao Al foliar (r = 0,82) e ao BAF-Al (r = 0,79), enquanto Al em frutos acompanhou Al foliar e BAF-Al (r = 0,76, em ambos os casos). Nesse mesmo período, Ni em frutos também se associou à matéria orgânica (r = 0,61). Esse conjunto de relações sugere que os acúmulos

nas estruturas reprodutivas acompanharam, em diferentes intensidades, os teores de matéria orgânica, a presença de metais no sedimento e o acúmulo foliar, apontando para múltiplas vias de transferência de elementos no ambiente costeiro.

Os potenciais efeitos da contaminação dos recursos florais da Restinga já foram observados pontualmente durante o monitoramento, quando a análise do pólen indicou que as concentrações de elementos abundantes no MLD, como Zn, Cu, Fe e Mn, atingiram valores superiores à média reportada para o Espírito Santo (MORGANO *et al.*, 2012) em amostras coletadas em Degredo (E10), no Compartimento C. Àquela época, as concentrações de Zn, Cu e Mn superaram as observadas nos sedimentos e nos tecidos foliares, indicando o bioacúmulo desses metais nos tecidos dos recursos florais.

Sob a perspectiva sazonal, a contaminação do pólen permaneceu elevada no período Chuvoso do Ano 6, embora em níveis inferiores aos observados no período seco anterior, em razão da maior oferta de recursos florais e da maior diluição dos elementos durante a estação chuvosa. Por outro lado, mesmo que os elementos minerais associados ao MLD não tenham sido detectados nas amostras de mel, a presença de concentrações potencialmente tóxicas no pólen pode afetar as larvas de abelhas, por constituir sua principal fonte de alimento (RANGEL *et al.*, 2022).

Com esses resultados, observa-se que a elevação simultânea de PEAR, IPI e BAF, sobretudo nos compartimentos B’ e C, e demonstra que a resposta do sistema se propaga para os compartimentos biológicos, refletindo transferência trófica e incorporação ecossistêmica dos contaminantes.

A proximidade da foz favorece o aporte contínuo de cargas fluviais enriquecidas em metais que, sob a influência de chuvas intensas, podem ser remobilizadas e incorporadas à água do mar. Pela ação dos ventos e da nebulização marinha, esses elementos são transportados pelo aerossol marinho e depositados diretamente sobre a vegetação de Restinga. Esses resultados evidenciam a complexidade dos processos de deposição e a relevância da variabilidade sazonal na dinâmica dos metais na vegetação de Restinga.

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

Os anos de monitoramento do ecossistema de Restinga reforçam a elevada complexidade e vulnerabilidade das formações vegetais frente à contaminação por elementos minerais associada ao rompimento da barragem de Fundão. Os resultados da Vitalidade da Vegetação da Restinga, ao longo dos anos de monitoramento, evidenciam padrões espaço-temporais heterogêneos, com manutenção das maiores intensidades de impacto nos compartimentos B’ e C. Apesar de sinais recentes de atenuação em parte dos abióticos, essas regiões ainda concentram respostas mais intensas,

persistentes e, em alguns casos, recorrentes, indicando que o processo de recuperação ocorre de forma não linear e espacialmente desigual.

As respostas da vegetação, avaliadas por meio das categorias biológicas de Produtividade primária, Metabolismo, Estresse oxidativo e Reprodução, continuam fortemente condicionadas à sazonalidade e à proximidade da foz do rio Doce. A incorporação dos dados do período seco do Ano 7 e chuvoso do Ano 8 confirma que estações como Degredo (E10), Cacimbas (E6) e REBio Comboios (E7) permanecem como áreas críticas, com maior bioacumulação de metais, especialmente Mn e Cu, e respostas fisiológicas mais evidentes, incluindo manutenção do estresse oxidativo e redução da produtividade primária. Os períodos chuvosos mais recentes indicam tendência de redução da criticidade da condição ambiental, possivelmente relacionada à redistribuição e diluição dos contaminantes, embora sem eliminação das fontes de impacto próximo à Foz do rio Doce. Embora nem sempre se reflita nas respostas do indicador Vitalidade da Vegetação, a tendência de impacto agudo é observada na vegetação herbácea, com maiores acúmulos de elementos em plantas desta formação. Já para a formação arbustiva os impactos crônicos e graduais, com alterações estruturais e funcionais em desenvolvimento continuam sendo mais característicos.

A influência da dinâmica fluvial e da morfodinâmica costeira se mantém como fator determinante na distribuição dos contaminantes. A maior mobilidade sedimentar, deposição de frações finas e presença de matéria orgânica nos compartimentos B’ e C favorecem a retenção e remobilização de metais, sustentando a persistência dos impactos. Esse padrão é particularmente evidente em Cacimbas (E6), no compartimento B’, que continua se destacando como área de elevada sensibilidade ambiental, com oscilações entre melhora e piora nos resultados de contaminação ao longo dos períodos mais recentes. A intensificação da contaminação por metais nos sedimentos e na vegetação de Restinga ao longo do tempo tem relação direta com Mn, Zn, As, Cu e Co. A análise integrada dos dados mais recentes indica uma tendência geral de redução da pressão de contaminação no sedimento, expressa pela melhora nos valores de PEAR e IPI em diversas estações, especialmente no período chuvoso do Ano 8. No entanto, essa tendência não é homogênea, sendo interrompida por episódios de aumento pontual desses índices, como observado em Cacimbas (E6) no período seco do Ano 7. Além disso, as correlações entre índices de contaminação e bioacumulação indicam que, mesmo com redução parcial da carga no sedimento, o sinal de contaminação ainda se propaga para os tecidos vegetais.

As espécies herbáceas continuam respondendo mais rapidamente às variações ambientais e à contaminação, apresentando maior bioacumulação de metais. Contudo, os dados mais recentes indicam também maior capacidade de resiliência dessa formação, com menor recorrência de áreas classificadas como “Perigo” ao longo do tempo, possivelmente associada à sua alta plasticidade ecológica, crescimento rápido e estratégias adaptativas.

Já a vegetação arbustiva apresenta respostas mais estáveis, porém sujeitas a impactos crônicos, especialmente em áreas com maior acúmulo de sedimentos finos e matéria orgânica. Nessas áreas, a retenção de contaminantes favorece a bioacumulação e a manutenção de respostas fisiológicas

persistentes, ainda que menos intensas do que nas herbáceas. Os dados mais recentes reforçam que essas respostas estão mais associadas à dinâmica ambiental do que a mudanças abruptas na carga de contaminantes.

A exclusão da formação arbórea a partir do Ano 7 representa uma limitação importante na interpretação da trajetória completa do ecossistema, uma vez que essa formação foi historicamente a mais impactada, especialmente no período seco. Ainda assim, os dados anteriores indicam que os efeitos da contaminação nessa comunidade são de longo prazo e de recuperação mais lenta, o que reforça a necessidade de estudos futuros para sua reavaliação. O desenho amostral envolvendo três comunidades vegetais historicamente constituindo o ecossistema Restinga se mostrou, desde o início, compatível com a pergunta central do projeto. Isso possibilitou o avanço nas interpretações envolvendo gradiente de contaminação no sentido mar-continente. O maior exemplo disso refere-se às discussões de retenção do aerossol marinho sobre a textura da vegetação (dossel), intimamente relacionada com os índices de diversidade apresentados ao longo das estações.

Em termos de estrutura, a comunidade de plantas herbáceas exibiu variações, especialmente nos Compartimentos B e C, ocasionadas por interferências naturais ligadas à erosão costeira, um fenômeno intensificado provavelmente pela instalação do MLD no fundo do oceano. A presença do MLD resultou em uma maior propagação da energia das ondas sobre as dunas. Consequentemente, foi observada redução da cobertura vegetal e um sério risco para as espécies ameaçadas presentes nessa comunidade. A frequência da erosão das dunas oscilou durante o período de monitoramento. A importância e a ocorrência das espécies ameaçadas mostraram um declínio persistente até o início do sétimo ano de observação, particularmente na Área de Proteção Ambiental (APA) de Conceição da Barra (E1). Outra interferência a ser considerada está relacionada à fenologia das espécies, quando algumas não aparecem nas amostragens por terem perdido suas folhas ou mesmo por sua morte, mas em outro momento o sistema volta a ser reestruturado, com o rebrotamento e mesmo ocupação por novos indivíduos da comunidade herbácea. Esse fato apoia a sugestão de que a vegetação da formação herbácea possui mecanismos morfo-anatômicos e fisiológicos de tolerância aos estresses ambientais típicos das zonas mais próximas ao mar. A comunidade herbácea é a que se encontra mais sujeita a interferências antrópicas, com entrada de veículos fora de trilhas pré-existentes, quando além de alterar por morte de indivíduos, possibilita a entrada de espécies exóticas ao ecossistema Restinga. Entretanto, a resiliência das espécies nativas possibilita ocupação posterior desses espaços, quando cessada a interferência, mesmo que ainda ocorram espécies exóticas.

Foram identificadas diferenças estruturais na comunidade arbustiva; entretanto, não foram observadas associações estatisticamente significativas entre essas alterações e os contaminantes provenientes do MLD. As variações estruturais observadas parecem estar relacionadas principalmente às características biológicas e fenológicas das espécies, como perda foliar e crescimento de ramos, que influenciam diretamente a área de cobertura da vegetação. Contudo, não se pode descartar que essas variações também representem potenciais mecanismos estruturais de resposta aos estresses ambientais. Este resultado corrobora o que vinha se observando entre as espécies da formação

arbórea. Apesar de terem sido removidas do escopo do monitoramento, os dados dessa fitofisionomia apontavam tendência semelhante.

Por fim, com base nas flutuações encontradas nas fenofases avaliadas, é fundamental a continuidade do monitoramento das fenofases em conjunto com os atributos fisiológicos e a influência dos contaminantes do MLD nas vegetações de Restinga, aprofundando a relação dos contaminantes nos processos reprodutivos das plantas. A incorporação de outros métodos e análises pode viabilizar a robustez das interpretações dos resultados, além de oferecer subsídios práticos na reparação dos danos provocados pelos contaminantes.

Os resultados consolidados até o Ano 8 indicam que, embora haja sinais de melhora em alguns ambientais, o ecossistema de Restinga, após oito anos de monitoramento trimestral, ainda não atingiu um estado de estabilidade. A persistência de metais no ambiente, sua bioacumulação e as respostas ecofisiológicas variáveis indicam que o sistema permanece em um estado de transição, com recuperação parcial e heterogênea. Os resultados demonstram ainda que as áreas de Restinga próximas à foz do rio Doce continuam concentrando os maiores níveis de impacto sobre a vegetação, decorrentes da interação entre a dinâmica fluvial e a deposição de elementos transportados pelo aerossol marinho. A permanência de contaminantes nos sedimentos, sua incorporação nos tecidos vegetais e a variabilidade das respostas ecofisiológicas nas formações herbácea e arbustiva evidenciam a complexidade dos processos que regulam esse ecossistema. A zona costeira monitorada revela elevada sensibilidade a eventos climáticos e à dinâmica morfodinâmica, reforçando a necessidade de manutenção do monitoramento ambiental contínuo. O estudo da ecologia funcional acoplada à fitossociologia e a florística durante quase dez anos ininterruptos faz deste estudo o maior estudo da vegetação de restinga até o momento. Para além dos efeitos ecológicos, destacam-se possíveis implicações sobre as cadeias tróficas e sobre as populações humanas que dependem dos recursos da Restinga, o que reforça a importância socioambiental de estratégias integradas e de longo prazo.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todas as metas do Tema Restinga foram cumpridas.

6 REFERÊNCIAS

ALTSCHUL, S.F., GISH W., MILLER, W., MYERS, E.W. AND LIPMAN, D.J. Basic Local Alignment Search Tool. **J. of Mol. Biol**., v. 215, p. 403-407, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0022-2836(05)80360-2.

APG IV - THE ANGIOSPERM PHYLOGENY GROUP. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v.181, n.1, p.1-20, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1111/boj.12385. Acesso em: 14 nov. 2020.

BACARIN, M. A.; MARTINAZZO, E. G.; CASSOL, D.; FALQUETO, A. R.; SILVA, D. M. Daytime variations of chlorophyll a fluorescence in pau d'alho seedlings. **Revista Árvore**, v.40, n.6, p.1023-1030, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0100-67622016000600007. Acesso em 13 jun 2022.

BELIAEFF, B.; BURGEOT, T. Integrated biomarker response: a useful tool for ecological risk assessment. **Environmental Toxicology Chemistry**, v.21, p.1316-1322, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1002/etc.5620210629. Acesso em: 14 nov. 2020.

BLOTT, S.J.; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. **Earth surface processes and Landforms**, v. 26, n. 11, p. 1237-1248, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1002/esp.261. Acesso em: 18 mar. 2023.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v.72, p.248–254, 1976. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3. Acesso em: 14 nov. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Portaria MMA nº 148, de 7 de junho de 2022**. Altera os Anexos da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, da Portaria nº 444, de 17 de dezembro de 2014, e da Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014, referentes à atualização da Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção. Diário Oficial da União, 108: 74-103, 2022.

BROWER, J.E., ZAR, J.H. **Field and Laboratory Methods for General Ecology**. 2nd Ed. Boston: Brown Publishers. 226p. 1984.

BROWER, J.E.; ZAR, J.H. **Field and Laboratory Methods for General Ecology**. Dubuque. Iowa: William C. Brown Company Publishers, 320p. 1977.

CAKMAK, I.; HORST, W.J. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities on root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, v.83, p.463-468, 1991. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x. Acesso em: 14 nov. 2020.

CARILLO, P.; GIBON, Y. PROTOCOL: Extraction and determination of proline. **Prometheus Wiki**.2011. Disponível em: http://prometheuswiki.org/tiki-index.php?page=Extraction+and+determination+of+proline. Acesso em: 14 nov. 2020.

CHEN, Y. E.; CUI, J. M.; LI, G. X.; YUAN, M.; ZHANG, Z. W.; YUAN, S.; ZHANG, H. Y. Effect of salicylic acid on the antioxidant system and photosystem II in wheat seedlings. **Biologia Plantarum**, v.60, p.139-147, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10535-015-0564-4

CLINEBELL, R.R.; PHILLIPS, O.L.; GENTRY, A.H.; STARK, N.; ZUURING, H. Prediction of neotropical tree and liana species richness from soil and climatic data. **Biodiversity and Conservation**, v.4, p.56-90, 1995. Disponível em: https://doi.org/10.1007/BF00115314. Acesso em: 14 nov. 2020.

DUTRA, V.F.; ALVES-ARAÚJO, A.; CARRIJO, T.T. Angiosperm checklist of Espírito Santo: using electronic tools to improve the knowledge of an Atlantic Forest biodiversity hotspot. **Rodriguésia**, v. 66, n. 4, p. 1145-1152, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2175-7860201566414. Acesso em: 14 nov. 2020.

EL-SHARKAWY, M.; ALOTAIBI, M. O.; LI, J., DU, D.; MAHMOUD, E. Heavy metal pollution in coastal environments: ecological implications and management strategies: a review. Sustainability, v.17, n.2, p.701. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su17020701.

ERDTMAN, G. The acetolysis method – A revised description. **Svensk Botanisk Tidskrift**, n.54, p.561–564, 1960.

ERK, M.; IVANKOVIC, D.; RASPOR, B.; PAVICI, J. Evaluation of different purification procedures for the electrochemical quantification of mussel metallothioneins. **Talanta**, v.57, p.1211-1218, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00239-4.

ESPÍRITO SANTO. **Decreto nº 5238-R, de 25 de novembro de 2022**. Declara as espécies da flora silvestres ameaçadas de extinção do Estado do Espírito Santo e dá outras providências. Diário Oficial dos Poderes do Estado, n.25.870: 14-48, 2022.

FERNIE, A.R.; ROSCHER, A.; RATCLIFFE, R.G.; KRUGER, N.J. Fructose 2,6-bisphosphate activates pyrophosphate: fructose-6-phosphate 1-phosphotransferase and increases triose phosphate to hexose phosphate cycling in heterotrophic cells. **Planta**, v.212, p.250–263, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s004250000386. Acesso em: 14 nov. 2020.

FEULGEN, R.; ROSSENBECK, H. Mikroskopisch-chemischer Nachweis einer Nucleinsäure vom Typusder Thymonucleinsaure und die daraufberuhende elektive Farbung vom Zelikernen in mikroskopischen Praparaten.Zts. Phys. Chem. v.135, n.5-6, p. 203-248, 1924. Disponível em: https://doi.org/10.1515/bchm2.1924.135.5-6.203.

FILGUEIRAS, T.S.; NOGUEIRA, P.E.; BROCHADO, A.L.; GUALA, G.F. Caminhamento: um método expedito para levantamentos florísticos qualitativos. **Cadernos de Geociências**, v.12, p.39-43, 1994.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. 2026. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2026. Disponível em: http://floradobrasil.jbrj.gov.br/.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Research**, v.27, n.1, p.3-26, 1957. Disponível em: https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d

FONSECA, C.L.S.; SILVA, D.M.; GASPARINI, T.A.S.; CUZZUOL, G.R.F. Photosynthesis of plants of shade-tolerant ecotype of *Paubrasilia echinata* are more tolerance to drought than the sun-tolerant

ecotype. **Plant Stress**, v. 8, p.100157, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100157

FRAGA, C.N.; CHAVES, G.F.; SILVA, J.P.; FORMIGONI, M.H.; RIBEIRO, R. S.; REIS, J C. L.; CAPELLÃO, R.T. **Espécies Ameaçadas do Espírito Santo**. Santa Teresa: Instituto Nacional da Mata Atlântica, 2019. Disponível em: http://tempustecnologia.com/site/. Acesso em: 20 ago. 2019.

GENTRY, A.H. The distribution and evolution of climbing plants. In: PUTZ, F.E.; Mooney, H.A. (Eds.). **The Biology of Vines**. Cambridge: Cambridge University Press, p.3-49, 1991.

GIULIETTI, A.M.; RAPINI, A.; ANDRADE, M.J.G.; QUEIROZ, L.P.; SILVA, J.M.C. **Plantas raras do Brasil**. Belo Horizonte: Conservação Internacional, 2009.

GUDIN, G. S.; DAMASCENO JR., P. C.; SANTOS, T. A.; SILVA, M. M.; PINTO, T. O.; BACARIN, M. A.; SILVA, D. M. How the tailings of the Fundão Dam impacted the photosynthetic metabolism and viability of pollen grains of *Canavalia rosea*. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v.36, p.701–716, 2024. https://doi.org/10.1007/s40626-024-00337-0

HIGGINS, M.A.; RUOKOLAINEN, K. Rapid Tropical Forest Inventory: A comparison of techniques based on inventory data from Western Amazonia. **Conservation Biology**, v.18, p.799–811, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00235.x

I3N. **Base de dados de espécies exóticas invasoras do Brasil**. Florianópolis-SC: Instituto Hórus de Desenvolvimento e Conservação Ambiental, 2020. Disponível em: http://bd.institutohorus.org.br. Acesso em: 15 mai. 2020.

JONES G.D.; BRYANT V.M. Jr. The use of ETOH for the dilution of honey. **Grana,** v.43, n.3, p.174–182, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00173130410019497

KALAJI, H. M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R. J. Chlorophyll *a* fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiol Plant**, v. 38, 102, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y

KAMPFENKEL, K.; VAN MONTAGU, M.; INZÉ, D. Effects of Iron Excess on *Nicotiana plumbaginifolia* Plants: Implications to Oxidative Stress. **Plant Physiology**, v.107, p.725-735, 1995. Disponível em: http://www.plantphysiol.org/content/plantphysiol/107/3/725.full.pdf. Acesso em: 14 nov. 2020.

LANA-COSTA, J.; MARTINS, A. O.; SILVA, M. M.; FIRMINO, A. D.; COSTA, P. M. A.; SILVA, D. M.; NUNES-NESI, A.; ARAÚJO, W. L. An integrated physiological and metabolic approach reveals how Restinga shrub species cope with the iron ore tailing plume along the coastal region of Espírito Santo-Brazil. **Environmental and Experimental Botany**, v.216, p.105535, 2023. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105535

LANA-COSTA, J.; SILVA, M. M.; GUARNIER, J. C.; MARTINS, A. O.; SILVA Jr., R. O.; SILVA, D. M.; NUNES-NESI, A.; ARAÚJO, W. L. Biochemical and physiological aspects of restinga herbaceous plants

tolerance to iron ore tailing plume along the coastal region of Espírito Santo-Brazil. **Environmental and Experimental Botany**, v.191, p. 104618, 2021. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104618

LI, Y.; LIN, Y.; LOUGHLIN, P.; CHEN, M. Optimization and effects of different culture conditions on growth of *Halomicronema hongdechloris* – a filamentous cyanobacterium containing chlorophyll f. **Front Plant Sci** v.25, p.5–67, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00067

LIMA, A.L.S.; DAMATTA, F.M.; PINHEIRO, H.A.; TOTOLA, M.R.; LOUREIRO, M.E. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions. **Environmental and experimental botany**, v.47, n.3, p.239-247, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0098-8472(01)00130-7. Acesso em: 14 nov. 2020.

LISEC, J.; SCHAUER, N.; KOPKA, J.; WILLMITZER, L.; FERNIE, A.R. Gas chromatography mass spectrometry–based metabolite profiling in plants. **Nature Protocols**. v.1, p.387–396, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nprot.2006.59. Acesso em: 14 nov. 2020.

LOURENÇO JR, J.; NEWMAN, E. A.; VENTURA, J. A.; MILANEZ, C. R. D.; THOMAZ, L. D.; WANDEKOKEN, D. T.; ENQUIST, B. J. Soil-associated drivers of plant traits and functional composition in Atlantic Forest coastal tree communities. **Ecosphere**, 12(7), e03629, 2021.

LOUVEAUX, J.; MAURIZIO, A.; VORWOHL G. Methods of melissopalynology. **Bee World,** v.59, 4, p.139–157, 1978. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0005772X.1978.11097714

MAGNAGO, L. F. S., MARTINS, S. V., SCHAEFER, C. E. V. R., NERI, A. R. Gradiente fitofisionômico-edáfico em formações florestais de Restinga no sudeste do Brasil. Acta Bot. Bras., v.24, n.3, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-33062010000300017

MAGNAGO, L. F. S., MARTINS, S. V., SCHAEFER, C. E. G. R., NERI, A. V. Structure and diversity of restingas along a flood gradient in southeastern Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 27(4), p. 801-809, 2013.

MELLO, M.L.S.; VIDAL, B.C. A reação de Feulgen. **Ciência e Cultura**, v.30, p.665-676, 1978.

MIRANDA, T.O.; CARVALHO, S.M. Levantamento quantitativo e qualitativo de indivíduos arbóreos presentes nas vias do bairro da ronda em Ponta Grossa-PR. **REVSBAU**, Piracicaba – SP, v.4, n.3, p.143 – 157, 2009. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5380/revsbau.v4i3.66436. Acesso em: 14 nov. 2020.

MOAR N.T. Pollen analysis of New Zealand honey. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.1, n.28, p.39–70, 1985. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00288233.1985.10426997

MORELLATO, L.P.C., RODRIGUES, R.R., LEITÃO FILHO, H.F.; JOLY, C.A. Estudo comparativo da fenologia de espécies arbóreas de floresta de altitude e floresta mesófila semi-decídua na Serra do Japi, Jundiaí. **Revista Brasileira de Botânica**, v.12, p.85-98, 1989. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-84042002000200012. Acesso em: 14 nov. 2020.

MORGANO, M. A., MARTINS, M. C. T., RABONATO, L. C., MILANI, R. F., YOTSUYANAGI, K., & RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. A comprehensive investigation of the mineral composition of brazilian bee pollen: geographic and seasonal variations and contribution to human diet. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.23(4), p.727–736, 2012. https://doi.org/10.1590/S0103-50532012000400019

MORO, M.F.; SOUZA, V.C.; OLIVEIRA-FILHO, A.T.; QUEIROZ, L.P.Q.; FRAGA, C.N.; RODAL, M.J.N.; ARAÚJO, F.S.; MARTINS, F.R. Alienígenas na sala: o que fazer com espécies exóticas em trabalhos de taxonomia, florística e fitossociologia? **Acta Botanica Brasilica**, v.26, n.4, p.991-999, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-33062012000400029. Acesso em: 14 nov. 2020.

MÜELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley and Sons Inc., 1974, 547p.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A.; & KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403(6772), p. 853-858, 2000.

NUNES-NESI, A.; CARRARI, F.; GIBON, Y.; SULPICE, R.; LYTOVCHENKO, A.; FISAHN, J.; RATCLIFFE, R.G.; SWEETLOVE, L.J.; FERNIE, A.R. Deficiency of mitochondrial fumarase activity in tomato plants impairs photosynthesis via an effect on stomatal function. **The Plant Journal**, v.50, p.1093–1106, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03115.x. Acesso em: 14 nov. 2020.

OLIVE, P. L. DNA precipitation assay: a rapid and simple method for detecting DNA damage in mammalian cells. **Environ. Mol. Mutagen**.v.11, n.4, p. -487-495, 1988. Disponível em: https://doi.org/10.1002/em.2850110409

PEDRETE, T.A.; HAUSER-DAVIS, R.A.; PEREIRA, L.HSS; TORRES, M.B; MOREIRA, J.C. Glutathione and metallothionein as oxidative stress biomarkers in the medicinal plant *Chrysobalanus icaco* L. from different Brazilian regions. **Journal of Plant Biology and Crop Research**, v.3, n.1, 1015, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341408442

PEREIRA, O. J. Restinga no Espírito Santo: vegetação, flora e distribuição geográfica das espécies. Vitória, Espírito Santo: Universidade Federal do Espírito Santo, 2022. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal – Fisiologia Vegetal). 654 p. Disponível em: https://biologiavegetal.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGBV/detalhes-da-tese?id=16548

PEREIRA, O. J. Restinga: origin, structure and diversity. In: JARDIM, M. A. G. et al. (Eds.). Challenges of Brazilian Botany in the New Millennium: Inventory, Systematization and Conservation of Plant Diversity. Belém: MPEG, UFRA, Embrapa, Museu Paraense Emílio Goeldi. p. 177–179, 2003. Disponível em: https://repositorio.museu-goeldi.br/handle/mgoeldi/1319

PHILLIPS, O.; MILLER, J.S. Global patterns of plant diversity: Alwyn H. Gentry´s forest transect data set. **Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden**, v.89, p.1-319, 2002.

PINHEIRO, H.A.; DAMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.; FONTES, E.P.; LOUREIRO, M.E. Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora* subjected to long-term

drought. **Plant science**, v. 167, n.6, p.1307-1314, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.06.027. Acesso em: 14 nov. 2020.

PSG; NUTRIPETRO. **Estudo de Impacto Ambiental: Terminal Portuário de Uso Múltiplo da Nutripetro**. Vitória, PSG EQUILIBRIUM DO BRASIL LTDA, 2013. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2013/Nutripetro/EIA%20-%20Nutripetro.pdf. Acesso em: 04 nov. de 2020.

QUEIROZ, H.M.; YING, S.C.; ABERNATHY, M.; BARCELLOS, D; GABRIEL, F.A.; OTERO, X.L.; NÓBREGA, G.N.; BERNARDINO, A.F.; FERREIRA, T.O. Manganese: the overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse. Environment International, v. 146, art. 106284, p.1-14, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106284.

RANGEL, L.B.; KOZOVITS, A.R.; MESSIAS, M.C.T.B.; ABREU, A.T.; ANTONIN, Y. Impacts of a tailing dam break on the contamination of pollen and honey from the stingless bee T*etragonisca angustula* (Apidae: Trigonini). **Journal Of Apicultural Research**, v.63, p.901-911, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00218839.2022.2081428.

SARKER, U.; OBA, S. Augmentation of leaf color parameters, pigments, vitamins, phenolic acids, flavonoids and antioxidant activity in selected *Amaranthus tricolor* under salinity stress. **Scientific Reports,** v.8, 12349, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-018-30897-6

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análise química de plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1974, 56p.

SCHEFFER, M.; CARPENTER, S.; FOLEY, J. A.; FOLKE, C.; WALKER, B. Catastrophic shifts in ecosystems. **Nature**, v. 413, n. 6856, p. 591–596, 2001. DOI: 10.1038/35098000

SHEPHERD, G.J. **FITOPAC**. Versão 2.1.2.85 Campinas, SP: Departamento de Botânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2010.

SILVA, E.; GUILHERME, M.D.F.; OLIVEIRA, H.; VIANA, Z.; SANTOS, V.L. Caracterização morfométrica e efeitos ecotoxicológicos do chumbo na germinação de sementes de *Schinus terebinthifolius* **Raddi. Arq. Inst. Biol.**, p.1-7, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1808-1657000272016

STRASSER, R.J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; QIANG, S.; GOLTSEV, V. Simultaneous *in vivo* recording of prompt and delayed fluorescence and 820 nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis***. Biochim. Biophys. Acta (BBA) – Bioenerg**. v.1797, p.1313-1326, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2010.03.008. Acesso em: 18 mar. 2022.

TALORA, D.C.; MORELLATO, L.P.C. Fenologia de espécies arbóreas em floresta de planície litorânea do sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v.23, n.1, p.13-26, 2000.

THOMPSON, J.D.; HIGGIS, D.G.; GIBSON, T.J. CLUSTALW: Improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. **Nucleic Acids Res**., v.22: p.4673-4680, 1994. Disponível em: https://doi.org/10.1093/nar/22.22.4673.

U.S. EPA. **Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils.** United States Environmental Protection Agency. Revision 1. Washington, DC, 2007.

U.S. EPA. **Method 3015A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts**, Revision 1. Washington, DC, 2007b.

USMAN, A.R.; LEE, S.S.; AWAD, Y.M.; LIM, K.J.; YANG, J.E.; OK, Y.S. Soil pollution assessment and identification of hyperaccumulating plants in chromated copper arsenate (CCA) contaminated sites, Korea. **Chemosphere**, v.87, n.8, p.872-878, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.01.028. Acesso em: 14 nov. 2020.

VIARENGO, A.; PONZANO, E.; DONDERO, F.; FABBRI, R. A Simple Spectrophotometric Method for Metallothionein Evaluation in Marine Organisms: an Application to Mediterranean and Antarctic Molluscs. **Marine Environmental Research**, v.44, p.69-84, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0141-1136(96)00103-1

WEI, B.; YANG, L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agriculture soils from China. **Microchemical Journal**, v.94, n.2, p.99–107, 2010. https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014.

WELLBURN, A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**. v.144, n3, p.307-313, 1994. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2. Acesso em: 14 nov. 2020.

YEMM, E.M. COCKING, E.C. The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst**, v.80, p.209-213, 1955. Disponível em: https://doi.org/10.1039/AN9558000209. Acesso em: 14 nov. 2020.

YU, H.; LI, C.; YAN, J.; MA, Y.; ZHOU, X.; YU, W.; KAN, H.; MENG, Q.; XIE, R.; DONG, P. A review on adsorption characteristics and influencing mechanism of heavy metals in farmland soil. **RSC Adv**. 2023 Jan 25;13(6):3505-3519. doi: 10.1039/d2ra07095b.

ZHANG, C.; YU, Z.; ZENG, G.; JIANG, M.; YANG, Z.; CUI, F.; ZHU, M.; SHEN, L.; HU, L.. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. **Environment International**. v.73, p.270-281, 2014. DOI: 10.1016/j.envint.2014.08.010.