



UFC

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR – LABOMAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS
TROPICAIS –PPGCMT**

ALEXANDRE DAVID DANTAS

**RASTREANDO MICROPLÁSTICOS EM ÁGUAS
COSTEIRAS: UM ESTUDO DE FATORES AMBIENTAIS
USANDO CANOA HAVAIANA**

Fortaleza
2025

ALEXANDRE DAVID DANTAS

**RASTREANDO MICROPLÁSTICOS EM ÁGUAS
COSTEIRAS: UM ESTUDO DE FATORES AMBIENTAIS
USANDO CANOA HAVAIANA**

**TRACKING MICROPLASTICS IN COASTAL WATERS: A
STUDY OF ENVIRONMENTAL DRIVERS USING HAWAIIAN
CANOE**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais.

Área de concentração: Ciência, tecnologia, gestão costeira e oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Tommaso Giarrizzo

Coorientador: Prof. Dr. Ryan Andrades

ALEXANDRE DAVID DANTAS

**RASTREANDO MICROPLÁSTICOS EM ÁGUAS
COSTEIRAS: UM ESTUDO DE FATORES AMBIENTAIS
USANDO CANOA HAVAIANA**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de concentração: Ciência, tecnologia, gestão costeira e oceânica.

Aprovado em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tommaso Giarrizzo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará-UFC

Prof. Dra Filipa Bessa.
University of Coimbra

Prof. Dra Tamyris Pegado de Souza e Silva
Universidade Federal do Pará-UFPA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D21r Dantas, Alexandre.
RASTREANDO MICROPLÁSTICOS EM ÁGUAS COSTEIRAS: : UM ESTUDO DE
FATORES AMBIENTAIS USANDO CANOA HAVAIANA / Alexandre Dantas. – 2025.
32 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar,
Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Tommaso Giarizzo .

Coorientação: Prof. Dr. Ryan Andrades.

1. poluição marinha. 2. dispersão de poluentes. 3. área protegida. 4. modelagem preditiva.
5. monitoramento. I. Título.

CDD 551.46

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Danielle Fachim e ao meu filho Zaion Fachim Dantas, pelo amor, paciência e apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. Tommaso Giarrizzo, grande idealizador do projeto e parceiro de longa data do ICMBio, pela orientação, inspiração e parceria incansável.

Ao Lucio Brabo, que coordenou o laboratório, contribuição fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Fred Keppeler, pela inestimável ajuda na análise de dados.

Aos analistas do laboratório, Emanuelle Ribeiro Lima, Teófilo, Ryan Andrades, Yan Clemente Carneiro, Francisco Daniel Lima de Souza, Orlando Siqueira dos Santos Junior, Gabriel Nicolas de Sousa, Ingrid Farias Cardoso, Maria Isadora de Sousa Dutra, Johanna De Souza Vidal, Carla Gisele Vieira Feitosa, Virna Sena Avelar e Letícia Alves Gomes, pelo suporte essencial na triagem, processamento e análise das amostras, garantindo a qualidade e rigor técnico das etapas laboratoriais.

Aos Clubes de remo KAYAKERIA e JERI OUTTRIGGER e seus remadores, Joep Cleiren, Galdino Malandrino, Thais Franco Bueno, Luciana Schieck Baptista, Marcela Guidi Falcon, Rayanne Beatriz Dias, Claudine Viezzer, Jessica Nunes, Diana Bandeira do Nascimento Martins, Marcos Paulo Titarelli, Carolina Garreta, Marcelo Machado, Tatiane Garcia, Wilsono Franklin Jr e tantas outros, cuja participação ativa possibilitou a execução das coletas em campo, demonstrando a viabilidade da integração entre ciência e esporte no monitoramento ambiental.

Ao Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR/UFC, pela infraestrutura disponibilizada para a realização das análises laboratoriais, e ao ICMBio, pelo suporte institucional e incentivo à pesquisa em unidades de conservação.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), através do projeto: “Detetives do Plástico: Uma abordagem Integrada para a Avaliação da Poluição por Plásticos na Costa Semiárida do Ceará” (UNI-0210-00136.01.00/23) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Transferência de Materiais Continente-Oceano-INCT-TMCO (Proc. No. 405.765/2022-3).

A todos, meu sincero agradecimento pela participação e dedicação que tornaram este trabalho possível.

“A obra 'Silent Spring' de Rachel Carson, que despertou o mundo para os perigos dos pesticidas, é tão impactante quanto a descoberta da 'sopa de plástico' nos oceanos”.

(Alexandre Dantas)

APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi elaborada no formato de publicação de artigo científico, seguindo o modelo estabelecido pelas diretrizes para autores da revista *Marine Pollution Bulletin*. Especificamente, o trabalho adota o formato *Baseline Papers*, que exige manuscritos com menos de 5.000 palavras, contendo um resumo e palavras-chave, além de seções específicas: uma introdução breve, metodologia com informações obrigatórias sobre garantia e controle de qualidade, resultados e discussão concisa. Diferentemente de artigos convencionais, *Baseline Papers* não possuem subdivisões em seções ou subseções e devem apresentar dados e informações originais relacionados à poluição marinha (como níveis de contaminantes, dados ecológicos e ecotoxicológicos), com o objetivo de contribuir para a compreensão de questões ambientais marinhas. Essa estrutura não apenas reflete rigor científico, mas também facilita a submissão do manuscrito à revista, ampliando a visibilidade do trabalho e contribuindo para o avanço do conhecimento nas Ciências Marinhas Tropicais.

Em consonância com o interesse do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais (PPGCMT) pelos ODS, este estudo integra os ODS 14 – Vida na Água e ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis. Além disso, atende aos critérios do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais (PPGCMT) a depender de aprovação do Colegiado.

RESUMO

A poluição por microplásticos (MPs) causa crescente preocupação ambiental, especialmente em zonas costeiras, onde fontes terrestres e marinhas interagem intensamente. Essas regiões concentram diversas atividades humanas, como turismo, pesca e navegação, além de abrigarem ecossistemas com alta biodiversidade. Este estudo avaliou a densidade e distribuição de MPs na superfície marinha na costa semiárida brasileira por meio de um amostrador horizontal composto por uma rede arrastada através de uma canoa havaiana, sendo uma potencial alternativa de monitoramento ambiental, de baixo custo e sustentável. Durante 12 meses, foram realizadas na maré de sizígia e de quadratura, amostragens em dois locais com diferentes níveis de urbanização: Fortaleza, uma área altamente impactada por atividades antrópicas, e Jericoacoara, um parque costeiro marinho distante de grandes centros urbanos. A densidade média de MPs foi de $1,20 \pm 2,30$ (0,09–22,18) partículas/m² em Fortaleza e $0,39 \pm 0,27$ (0,05–2,06) partículas/m² em Jericoacoara. As análises identificaram as fibras como o tipo predominante de MPs (54,3%), seguidas por fragmentos (35,4%), sendo o polietileno (PE) e o polipropileno (PP) os polímeros mais comuns. O modelo *Boosted Regression Trees* (BRT) apontou a velocidade do vento como a variável mais influente (26,5%), seguida pela localidade (19,5%) e pela pluviosidade mensal (12,5%). A interação entre direção do vento e altura das ondas (4,3%) comprovaram o papel das condições meteorológicas na dispersão dos MPs. Os resultados evidenciam a influência das correntes costeiras, do vento e das ondas na modulação da distribuição dos MPs e demonstram a eficácia da participação de praticantes de canoa havaiana como ferramenta para o monitoramento ambiental com baixa pegada ambiental.

Palavras-chave: poluição marinha; dispersão de poluentes; área protegida; modelagem preditiva; monitoramento.

ABSTRACT

Microplastic (MP) pollution is an increasing environmental concern, particularly in coastal zones where terrestrial and marine sources interact intensely. These regions host various human activities, such as tourism, fishing, and navigation, while also supporting ecosystems with high biodiversity. This study assessed the density and distribution of MPs in surface waters along the semi-arid Brazilian coast using a horizontal sampler consisting of a net towed by a Hawaiian canoe, providing a low-cost and sustainable alternative for data collection. Over 12 months, sampling was conducted during spring and neap tides at two locations with different levels of urbanization: Fortaleza, a highly impacted area affected by anthropogenic activities, and Jericoacoara, a coastal marine park distant from major urban centers. The average MP density was 1.20 ± 2.30 (0.09–22.18) particles/m² in Fortaleza and 0.39 ± 0.27 (0.05–2.06) particles/m² in Jericoacoara. The analyses identified fibers as the predominant MP type (54.3%), followed by fragments (35.4%), with polyethylene (PE) and polypropylene (PP) being the most common polymers. The Boosted Regression Trees (BRT) model indicated wind speed as the most influential variable (26.5%), followed by location (19.5%) and monthly rainfall (12.5%). The interaction between wind direction and wave height (4.3%) confirmed the role of meteorological conditions in MP dispersion. The results highlight the influence of coastal currents, wind, and waves in modulating MP distribution and demonstrate the effectiveness of engaging Hawaiian canoe practitioners as a low-impact tool for environmental monitoring.

Keywords: marine pollution; pollutant dispersion; protected area; predictive modeling; monitoring.

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.** (A) Área de estudo destacando as duas regiões costeiras amostradas na costa do Ceará-Brasil; (B) Parque Nacional de Jericoacoara e o setor da praia onde a coleta foi realizada; (C) cidade de Fortaleza, com destaque na área de coleta realizada na Enseada do Mucuripe; (D) canoa havaiana utilizada na coleta em Fortaleza; (E) Remadores em Jericoacoara com destaque na rede de microplástico (seta amarela) fixada ao yako (braço de madeira) da canoa..... 13
- Fig. 4.** Gráficos de dependência parcial gerados a partir do modelo *Boosted Regression Trees* (BRT). Cada painel ilustra a relação entre uma variável preditora (eixo x) e os valores ajustados (eixo y) da densidade de microplásticos. Velocidade do vento (S_wind); local (Site); pluviosidade mensal (Pluvio_Month); direção da onda (D_wave); direção do vento (D_wind); altura da onda (D_wave); pluviosidade diária (Pluvio_day) e maré (Tide).....20
- Fig. 5.** Gráfico de dependência parcial gerado a partir de um modelo de *Boosted Regression Trees* (BRT). Ele ilustra a relação entre a variável preditora "D_wave" (direção das ondas) e o valor ajustado da densidade de microplásticos (eixo y) em duas localidades: Fortaleza (linha sólida) e Jericoacoara (linha tracejada). O eixo x representa os ângulos da direção das ondas (em graus), enquanto o eixo y indica os valores ajustados (*fitted values*), que refletem a influência relativa dessa variável na densidade de microplásticos, considerando as demais variáveis constantes. O gráfico revela padrões específicos de acumulação para cada localidade. Em Fortaleza, observa-se maior variabilidade nos valores ajustados, sugerindo maior influência da direção das ondas na densidade dos MPs. Em Jericoacoara, a influência é mais uniforme, com menor variação ao longo das diferentes direções de onda.21
- Fig. 6** Os gráficos tridimensionais apresentam as interações entre variáveis ambientais modeladas pelo *Boosted Regression Trees* (BRT), com valores ajustados da densidade de microplásticos (*fitted value*, eixo

Z, variando de -3 a 1). (A) relação entre a velocidade do vento (S_wind, eixo X, variando de 0 a 20) e a altura das ondas (H_wave, eixo Y, variando de 0,5 a 1,5). (B) relação entre a velocidade do vento e a direção do vento (D_wind, eixo Y, variando de 0 a 150 graus).....23

Fig. 7. A ordenação db-RDA apresenta a distribuição dos microplásticos (MPs) em Fortaleza e Jericoacoara com base nas suas formas. O eixo db-RDA 1 explica 34,48% da variação, enquanto o eixo db-RDA 2 explica 14,95%.25

Fig. 8. Ordenação de db-RDA da distribuição dos microplásticos (MPs) em Fortaleza e Jericoacoara com base nas suas cores. O eixo db-RDA 1 explica 41,82% da variação, enquanto o eixo db-RDA 2 explica 7,08.....25

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
SUMÁRIO.....	12
1 RASTREANDO MICROPLÁSTICOS EM ÁGUAS COSTEIRAS: UM ESTUDO DE FATORES AMBIENTAIS USANDO CANOA HAVAIANA	11
2 LIMITAÇÕES	27
REFERÊNCIAS.....	28

1 RASTREANDO MICROPLÁSTICOS EM ÁGUAS COSTEIRAS: UM ESTUDO DE FATORES AMBIENTAIS USANDO CANOA HAVAIANA

Os plásticos, polímeros orgânicos sintéticos amplamente utilizados devido ao seu baixo custo e versatilidade, tornaram-se indispensáveis na sociedade moderna. Contudo, sua resistência à degradação, capacidade de fragmentação e a falta de gestão adequada de resíduos sólidos têm resultado em uma crise ambiental global cada vez mais alarmante (UNEP, 2021; Thompson et al., 2024). No ambiente marinho, os resíduos plásticos são amplamente encontrados em todos os ecossistemas, incluindo praias e costões na zona costeira até zonas oceânicas e fossas submarinas em profundidades abaixo de 2000 m (Thompson et al., 2004; Law e Thompson, 2014). No entanto, a poluição por plásticos não ocorre de forma uniforme nos oceanos.

Os microplásticos (MPs), resíduos plásticos menores que 5 mm, estão onipresentes nos ecossistemas aquáticos e causam impactos no ambiente e na saúde pública. Entre os principais efeitos associados aos MPs estão a perda de biodiversidade, a bioacumulação e biomagnificação de contaminantes químicos na cadeia alimentar, e os riscos à saúde humana (Megha et al., 2025). Além disso, sua presença agrava a degradação da qualidade da água e intensifica problemas, como a introdução de espécies (Galloway et al., 2017; Thushari et al., 2017; Gaylarde et al., 2023). Além disso, os MPs contribuem para as mudanças climáticas, liberando gases de efeito estufa, como CO_2 , CH_4 e N_2O , durante seu processo de degradação e alterando ciclos biogeoquímicos, como os do carbono e nitrogênio (Li et al., 2024). Os MPs também interferem na capacidade dos oceanos de armazenar carbono e, na atmosfera, podem atuar como núcleos de condensação, impactando processos climáticos e radioativos (Li et al., 2024).

Nas zonas costeiras, a troca de matéria entre o continente e o oceano atua como vetor crítico para a entrada de MPs no ambiente marinho (Haan et al., 2022). A distribuição desses contaminantes é influenciada por uma combinação de fatores climáticos e hidrodinâmicos, como correntes oceânicas, ventos, ondas e chuvas (Critchell e Lambrechts, 2016; Vermeiren et al., 2016; Zhang, 2017; Tang et al., 2023). Compreender esses processos de dispersão na zona costeira é essencial para estimar padrões de acúmulo e prever *hotspots* de poluição por MPs, contribuindo para estratégias eficazes de monitoramento e mitigação. No entanto, a maioria das pesquisas realizadas apresenta limitações temporais, concentrando-se em

campanhas pontuais ou períodos de poucos meses (Camins et al., 2020; Miyazono et al., 2021; Nhon et al., 2024), dificultando a avaliação de tendências sazonais e de longo prazo.

Iniciativas que integram monitoramento científico, práticas esportivas e participação comunitária têm demonstrado eficácia na coleta de dados em áreas até 200 m da costa e tem um grande potencial para contribuir para o monitoramento de microplásticos no ambiente marinho. Um exemplo é o projeto "*Surfing for Science*", coordenado pela Universidade de Barcelona e pela *Surfrider Foundation*, onde pranchas de *stand up padlle* (SUP), caiaques e barcos a remo equipados com redes especiais para coletar amostras de microplásticos na superfície do mar foram utilizadas para amostragem de MPs no ambiente (Camins et al., 2020). Outro exemplo é o "*Smart Fin Project*", desenvolvido pelo *Scripps Institute of Oceanography*, que equipou quilhas de pranchas de surfe e SUP com sensores para medir a temperatura da água, acidez e outros parâmetros ambientais enquanto os surfistas praticam o esporte (Brewin et al., 2017).

Inspirado nessas práticas, este estudo investigou, por meio de amostragens padronizadas com canoa havaiana, a densidade e a dispersão de MPs na costa semiárida brasileira em função de variáveis categóricas como característica do local (urbano e prístina) e da maré (quadratura e sizígia) assim como variáveis ambientais e hidrodinâmicas contínuas como aspectos do vento, onda e chuvas. Para realização da coleta de MP na superfície do mar, foi utilizado um sistema adaptado de baixo custo, desenvolvido para acoplar um amostrador diretamente à canoa havaiana, dispensando o uso de embarcações motorizadas e reduzindo significativamente os custos operacionais e minimizando as emissões de carbono geradas na pesquisa. A coleta de amostras foi realizada com a participação voluntária de remadores de canoa havaiana, que foram devidamente instruídos para colaborar com o processo de amostragem durante suas práticas esportivas. Essa abordagem inovadora integra práticas esportivas e científicas, permitindo a obtenção de dados de maneira acessível, sustentável e eficiente, enquanto explora a viabilidade do uso de esportes náuticos como ferramenta para monitoramento ambiental (Brewin et al., 2017).

As amostragens foram realizadas em duas regiões costeiras do estado do Ceará, que apresentam níveis contrastantes de urbanização e uso da zona costeira, proporcionando um panorama diversificado para a análise da distribuição de MPs. O Parque Nacional de Jericoacoara (Figura 1B), especificamente a área marinha do

Costão Rochoso do Serrote, representa um ambiente com menor pressão antrópica. Localizado no município de Jijoca de Jericoacoara-CE, a área possui uma densidade demográfica de 122,26 habitantes/km² em uma área urbanizada de 7,90 km² (IBGE, 2022). A amplitude das marés na região varia entre 2,4 m na sizígia e 2,2 m na quadratura. Embora a interferência humana seja mais restrita devido ao status de unidade de conservação de proteção integral, atividades como turismo e pesca artesanal realizadas no entorno, ainda exercem influência sobre o ambiente local. A segunda área de estudo é a metrópole de Fortaleza, onde se localiza a Enseada do Mucuripe (Figura 1C). Caracterizada por sua elevada densidade populacional, Fortaleza é a quarta cidade mais populosa do Brasil e a capital com a maior densidade demográfica do país, com 7.775,52 habitantes por quilômetro quadrado em uma área urbanizada de 253,69 km² (IBGE, 2022). A amplitude das marés de Fortaleza varia entre 2,6 m na sizígia e 1,7 m na quadratura. A intensa atividade turística na região, que inclui pesca, recreação, navegação e o descarte de águas residuárias, configura um cenário propício à entrada de MPs no ambiente marinho costeiro.



Fig. 1. (A) Área de estudo destacando as duas regiões costeiras amostradas na costa do Ceará-Brasil; (B) Parque Nacional de Jericoacoara e o setor da praia onde a coleta foi realizada; (C) cidade de Fortaleza, com destaque na área de coleta realizada na Enseada do Mucuripe; (D) canoa havaiana utilizada na coleta em Fortaleza; (E) Remadores em

Jericoacoara com destaque na rede de microplástico (seta amarela) fixada ao yako (braço de madeira) da canoa.

A coleta de MPs foi realizada por meio de um amostrador de água superficial desenvolvido e adaptado para maximizar a eficiência na coleta de materiais flutuantes. A estrutura principal é composta em aço inoxidável de 2 mm. A boca do amostrador é retangular com 38 cm de largura por 30 cm de altura, dimensionada para otimizar a captação superficial de água e visar a eficiência na coleta de microplásticos sem comprometer a mobilidade ou a funcionalidade do equipamento. A filtragem foi realizada por meio de uma tela de poliamida (nylon), com uma malha de 330 μm de abertura. Um saco coletor com abertura de malha de 330 μm e capacidade de 500 mL foi acoplado a um aro de PVC na parte traseira da rede, para facilitar o manuseio na coleta e de amostras. Um fluxômetro mecânico (Model 2030R Flowmeter) foi acoplado à entrada da rede para medir o volume de água filtrado na rede em cada arrasto. Para assegurar a estabilidade e a flutuabilidade necessárias durante a operação, o coletor foi equipado com dois canos de PVC de 4" de diâmetro e 90 cm de comprimento com tampas nas extremidades, posicionadas de maneira paralela às laterais da estrutura. O equipamento possui peso total estimado em 5 kg e inclui dois cabos de aço inox de 1m conectado no yako (braço que conecta o ama ao kino conforme Figura 1-E) ficando posicionado lateralmente a canoa havaiana, para facilitar o arrasto e permitir ao operador manusear a rede sob várias condições de coleta.

Em cada região costeira, as coletas ocorreram durante 12 meses (nov/2023 a out/2024), duas vezes ao mês, durante as marés de sizígia (lua nova ou cheia) e quadratura (minguante ou crescente) em sentido contra a corrente marinha. O amostrador projetado foi arrastado durante a prática da canoa havaiana do tipo OC6, com 6 remadores, garantindo uma velocidade média de 3 km/h. Em cada evento de coleta foram tomadas quatro amostras sendo cada uma obtida através de arrastos horizontais superficiais de 400 m, registrando os trajetos com uso de GPS (Garmin, GPSMAP64). Após cada arrasto, o saco coletor era removido e armazenado em frascos de vidro devidamente rotulados com o código de campo. Antes da fixação de um novo coletor, a rede era lavada com água do mar para remover resíduos aderidos e evitar contaminações entre amostras.

As amostras obtidas foram levadas ao laboratório onde foram processadas em três etapas: lavagem, triagem e classificação. A lavagem foi realizada com água destilada e peneira (120 μm). Em seguida, com o auxílio de uma pinça, foram retirados

e lavados todos os itens macroplásticos (>2,5 cm) e, na medida do possível, as partículas orgânicas. Na sequência, a amostra foi transferida da peneira para placas de Petri de vidro com tampa, sendo identificadas com o código de campo. A triagem foi realizada observando diretamente a placa de Petri com o auxílio de um estereomicroscópio Zeiss, Stemi 305 body, no qual cada plástico identificado foi pinçado e colocado em um tubo Eppendorf (5 mL) com água destilada, identificando-o com o código correspondente. Na etapa de classificação, os plásticos coletados foram analisados com o auxílio de um estereomicroscópio Zeiss Stemi 506 acoplado com uma câmera AxioCam ERc 5s e com o ZEN microscopy software. Assim, cada plástico foi medido e classificado em microplástico ou mesoplástico, em seguida, categorizado por tipo (i.e., fibra, fragmento, filme, pellet, foam e glitter) e por cor. Posteriormente, uma subamostra dos plásticos de cada tipo e cor foi aleatoriamente submetida à análise de espectroscopia usando o método ATR-FTIR (*Attenuated Total Reflectance - Fourier Transform Infrared*), com o objetivo de identificar os polímeros que compunham os materiais encontrados.

Foi estabelecido um protocolo de controle de contaminação adaptado de Prata et al. (2021) em todas as etapas desde a amostragem, fixando filtros em placas de Petri próximo a rede durante o arrasto e no momento da passagem dos sacos coletores até os potes de vidro para atuarem como brancos analíticos; e no laboratório com regras pré-estabelecidas: (1) As únicas pessoas na sala foram pesquisadores que tiveram as cores da sua vestimenta registradas. (2) portas e janelas foram mantidas fechadas, além de ar-condicionado desligado, (3) Materiais e equipamentos utilizados durante o processamento laboratorial foram limpos antes e após cada análise dos procedimentos com água destilada e álcool isopropílico filtrados, e protegida com papel alumínio ou tampa de vidro. (4) Duas placas de Petri limpas com água destilada filtrada foram colocadas nas bancadas e de cada lado dos estereomicroscópios durante cada etapa dos procedimentos laboratoriais e inspecionados antes e após cada etapa para identificar possível contaminação externa. Os dados das amostras dos brancos analíticos foram posteriormente cruzados com os dados das amostras coletadas e possíveis contaminações descartadas.

A relação entre a densidade de MPs e as variáveis preditoras ambientais e espaciais foi analisada utilizando o modelo *Boosted Regression Trees* (Elith et al., 2008) uma abordagem de *Machine Learning* que combina algoritmos de árvores de

decisão com algoritmos de *boosting*. Este método é amplamente reconhecido em estudos ecológicos por sua capacidade de lidar com relações não lineares e interações complexas entre variáveis, tornando-o ideal para explorar os fatores que influenciam a distribuição e a concentração de microplásticos em águas costeiras (Elith et al., 2008; Pichler e Hartig, 2023).

As variáveis preditoras selecionadas incluíram fatores ambientais e regionais que potencialmente impactam a dispersão de microplásticos: *Pluvio_Month*, representando a pluviosidade mensal acumulada (<http://www.funceme.br>) a fim de avaliar e seu papel no aporte de resíduos terrestres para áreas costeiras; *D_wave* e *D_wind*, que correspondem, respectivamente, à direção das ondas e dos ventos, indicando os padrões possíveis de transporte e mistura; *H_wave*, que considera a altura das ondas como fator na dispersão vertical e horizontal dos MPs; *S_Wind*, que representa a velocidade do vento como fator na movimentação e redistribuição de partículas (<http://surfguru.com.br>) e *Site*, para capturar diferenças regionais entre Fortaleza e Jericoacoara, marcadas por distintos níveis de urbanização e uso do solo. Adicionalmente, o regime de marés, *Tide*, diferenciado em condições de quadratura e sizígia, para avaliar se as variações de amplitude das marés influenciam a concentração dos MPs. Para facilitar a interpretação dos resultados, as variáveis contínuas foram padronizadas, enquanto as variáveis categóricas foram tratadas como fatores.

A implementação do modelo foi realizada no software R, utilizando o pacote GBM (Ridgeway et al., 2024). Parâmetros cruciais foram ajustados para otimizar a performance do modelo, incluindo a taxa de aprendizado, definida como 0,01 para garantir que cada árvore contribuísse gradualmente à construção do modelo final, reduzindo o risco de *overfitting*; a complexidade da árvore, estabelecida em 3, permitindo capturar interações de até três variáveis simultaneamente; e o número de árvores, determinado por validação cruzada para balancear desempenho preditivo e generalização. A avaliação do modelo foi conduzida através de validação cruzada e comparada com uma regressão múltipla sem termos de interação. Também conduzimos um processo de seleção de modelos do tipo *backward* (Elith et al., 2008) para verificar se a remoção sequencial de variáveis menos relevantes afeta a performance preditiva do modelo. A importância relativa das variáveis preditoras foi calculada e gráficos de dependência parcial foram construídos para fornecer insights detalhados sobre os efeitos marginais de cada variável. Além disso, foram gerados

gráficos de ordenação por meio da Análise de Redundância Baseada em Distância (db-RDA) para avaliar a composição de MPs entre os locais.

Como resultado, a pesquisa percorreu, ao todo, 76,8 km, realizando 191 coletas válidas. No total, foram identificados 23.159 MPs, após a exclusão de 2.215 MPs classificados como contaminação, correspondendo a uma taxa de 8,73%. O procedimento adotado seguiu as diretrizes propostas por Cowger et al. (2024), que ressaltam a importância de critérios rigorosos para garantir a representatividade e a confiabilidade na análise de microplásticos. A densidade média total de MPs foi de $0,47 \pm 0,61$ (min – max: 0,05 – 5,06) partículas/m². Fortaleza apresentou densidade média de $1,20 \pm 2,30$ partículas/m²; (min – max: 0,09–22,18), valor superior aos registrados na costa de Barcelona, Espanha ($0,0112 \pm 0,0031$ partículas/m²) (Camins et al., 2020) e em Can Gio, no sul do Vietnã ($0,074 \pm 0,109$ partículas/m²) (Nhon et al., 2024). No entanto, o valor registrado para Fortaleza aproxima-se da média encontrada na costa sul do Vietnã, em Tien Giang, com $0,56 \pm 0,35$ partículas/m² (Nhon et al., 2024), e do reportado no Mar do Sul da Coreia, com média de $0,71 \pm 1,64$ partículas/m² (Kim et al., 2024). Por outro lado, Jericoacoara apresentou uma densidade média de $0,39 \pm 0,27$ (0,05 – 2,06) partículas/m², situando-se em um intervalo semelhante ao de Tien Giang, no Vietnã $0,56 \pm 0,35$ partículas/m², mas acima dos valores registrados para Barcelona e Can Gio.

Os tipos de MPs encontrados foram predominantemente fibras (54,34%) e fragmentos (35,45%), refletindo diferentes fontes de origem (Figura 2). Os fragmentos são derivados da degradação de plásticos maiores, como embalagens e sacolas, enquanto as fibras são amplamente associadas à indústria do vestuário, à lavagem de roupas, ao efluente doméstico e a presença de resíduos têxteis e plásticos em corpos d'água, frequentemente transportados por sistemas de drenagem urbana (Singh et al., 2020; Mishra et al., 2022). Estudos como os de Volgare et al. (2021) e Gaylarde et al. (2021) destacam a lavagem de tecidos sintéticos como uma das principais fontes de liberação de microfibras no ambiente aquático. Outros tipos de MPs identificados como espuma, pellet, filme, glitter representaram 10,21%. O tamanho médio dos MP foi de $2,44 \text{ mm} \pm 1,78$ (0,05 – 4,99). Foram identificadas 16 cores, sendo as mais comuns transparentes (31,9%), azuis (24,5%) e brancas (15,2%). A predominância de resíduos plásticos transparentes pode ser atribuída a uma ação degradativa maior da luz UV sob os resíduos plásticos em águas mais próximas da costa, ocasionando a perda de pigmento (Wong et al., 2020), enquanto

cores azuis e brancas apontam para materiais descartáveis, embalagens plásticas e itens marítimos como redes e cordas de pesca, comuns em ambientes costeiros (Thompson et al., 2004; Law & Thompson, 2014).

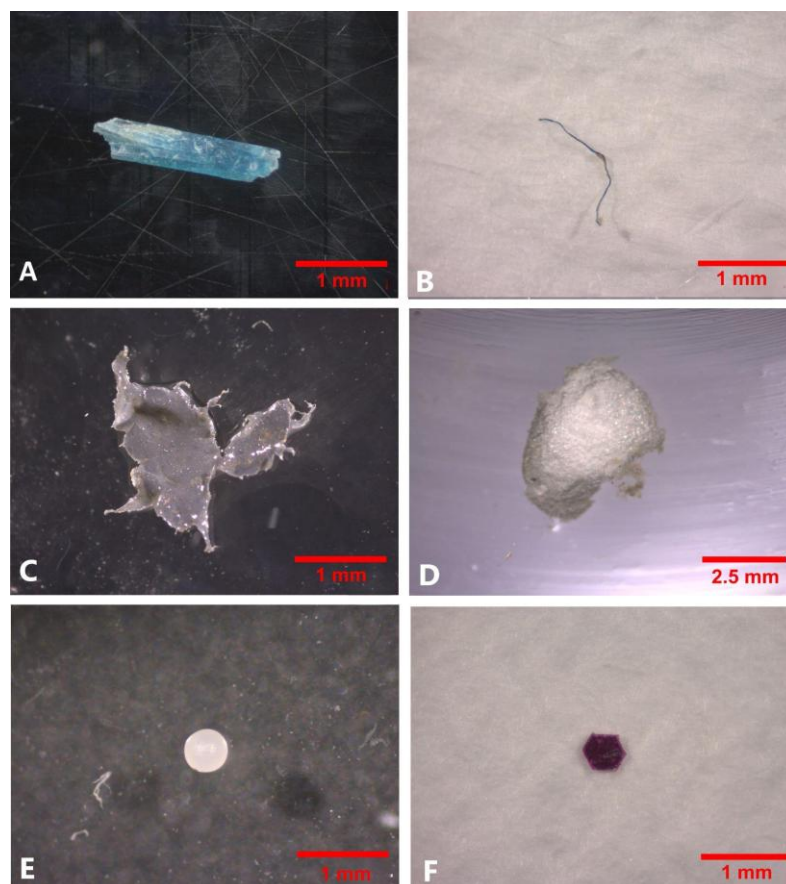


Fig. 2. Tipos de microplásticos encontrados durante o estudo. (A) Fragmento; (B) Fibra; (C) Filme; (D) Espuma; (E) Pellet; (F) Glitter.

A análise polimérica revelou o polietileno (PE) como polímero predominante, representando 36% dos MPs identificados, seguido pelo polipropileno (PP) com 29% e pelo poliestireno (PS) com 14% (Figura 3). Os demais polímeros, como poliéster, poliamida, LDPE e HDPE, apresentaram proporções iguais de 7% cada. A predominância de polímeros de baixa densidade (PE e PP) resultam em seu acúmulo preferencial na microcamada superficial do mar observados em estudos similares, na costa da Espanha, Vietnã e Índia que analisaram coletas superficiais (Haan et al., 2022; Nhon et al., 2024; James et al., 2025).

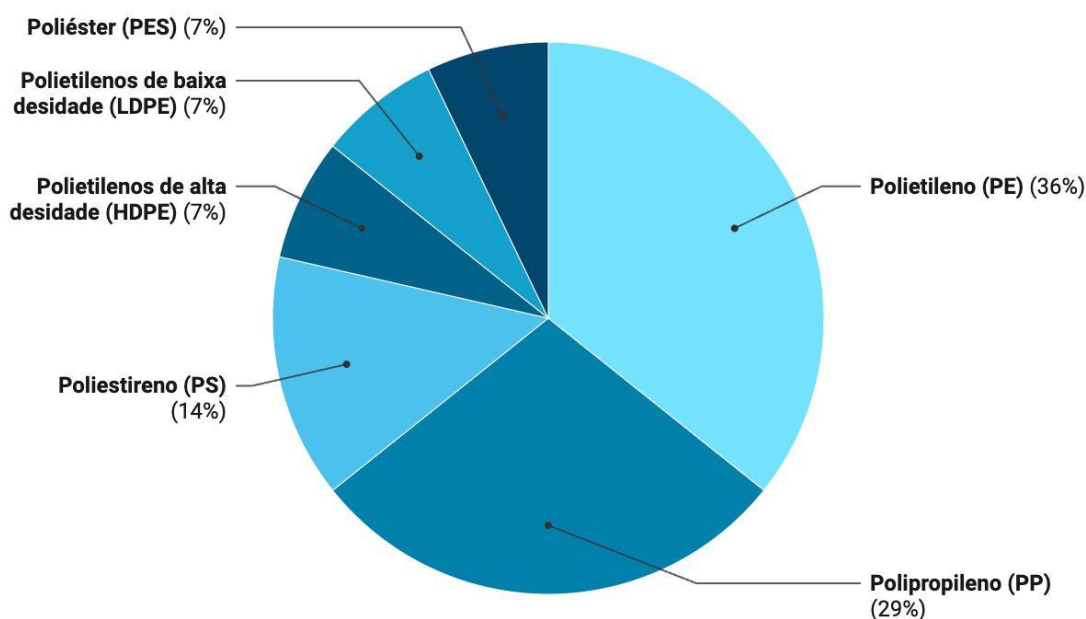


Fig. 3. Distribuição (%) dos polímeros identificados através da análise de espectroscopia usando o método ATR-FTIR (Attenuated Total Reflectance - Fourier Transform Infrared).

Os resultados obtidos por meio do modelo *Boosted Regression Trees* (BRT) evidenciaram a complexidade das interações entre variáveis ambientais e hidrodinâmicas, explicando 77% da variância na determinação da densidade de microplásticos nas zonas costeiras de Fortaleza e Jericoacoara. O modelo foi construído com 3.850 árvores, apresentando uma medida de erro relativo de 0,23, demonstrando alta confiabilidade na análise e interpretação dos dados. A variável mais influente foi a velocidade do vento, que contribuiu com 26,5% de importância relativa no modelo (Figura 4). Este resultado sugere que a velocidade do vento desempenha um papel crucial no transporte e deposição de microplásticos, potencialmente refletindo os padrões de circulação costeira específicos de cada localidade.

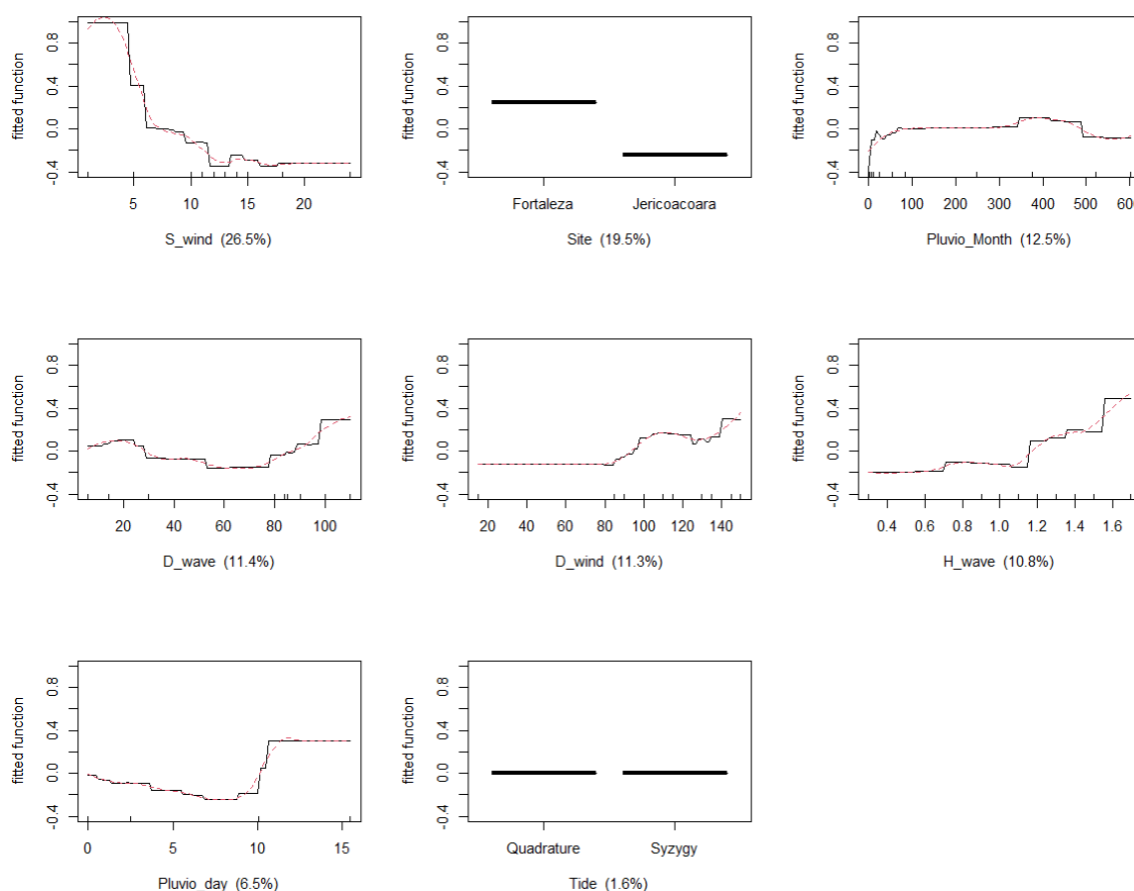


Fig. 4 Gráficos de dependência parcial gerados a partir do modelo *Boosted Regression Trees* (BRT). Cada painel ilustra a relação entre uma variável preditora (eixo x) e os valores ajustados (eixo y) da densidade de microplásticos. Velocidade do vento (S_wind); local (Site); pluviosidade mensal (Pluvio_Month); direção da onda (D_wave); direção do vento (D_wind); altura da onda (D_wave); pluviosidade diária (Pluvio_day) e maré (Tide).

A variável "localidade" mostrou-se altamente relevante, com uma contribuição relativa de 19,5%, revelando variações espaciais significativas entre Fortaleza e Jericoacoara. Essas diferenças podem estar associadas à intensidade das atividades humanas em cada localidade, sustentando a hipótese de que a alta densidade populacional influencia diretamente a concentração de microplásticos, conforme proposto por Yamashita e Tanimura (2007) e Barnes et al. (2009).

Além disso, a pluviosidade mensal foi identificada como a terceira variável mais relevante, com uma contribuição relativa de 12,5%. Foi observado que os meses de chuva (março, abril e maio), coincidem com aumentos significativos na densidade de microplásticos, corroborando a hipótese de que o escoamento superficial gerado pelas chuvas atua como um vetor primário no transporte desses contaminantes para o ambiente marinho. Esse padrão evidenciou um comportamento sazonal, caracterizado por densidades mais elevadas durante os períodos de chuvas intensas, conforme também relatado por Nhon et al. (2024).

As variáveis direção de onda, direção do vento e altura de onda apresentaram uma influência moderada, com contribuições relativas de 11,4%, 11,3% e 10,8%, respectivamente, no modelo, indicando seu papel na modulação do transporte e acúmulo superficial de MPs. Por outro lado, a pluviosidade diária, com uma influência de 7,8%, demonstrou um impacto menor, mas ainda relevante, especialmente em eventos de curto prazo, como chuvas intensas, registradas em março em Fortaleza, que potencialmente aumentaram o aporte de MPs para o ambiente costeiro. A variável maré, contribuiu relativamente com 2,6% e também não apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os regimes de quadratura e sizígia em relação à densidade de MPs, sugerindo uma menor relevância desse fator na variação espacial e temporal observada.

As interações identificadas pelo modelo BRT representam como diferentes variáveis atuam em conjunto para influenciar a densidade de MPs, indo além de seus efeitos isolados. A interação entre o local de estudo e a direção das ondas (Site \times D_wave) foi a maior, com relevância de 5,09% (Figura .5). Em ambas as localidades, as ondas provenientes de leste, com valores entre 80° e 100°, mostraram-se associadas ao aumento da densidade de MPs, principalmente devido ao transporte promovido pelas correntes oceânicas, que trazem MPs de outras fontes a leste para as respectivas regiões costeiras.

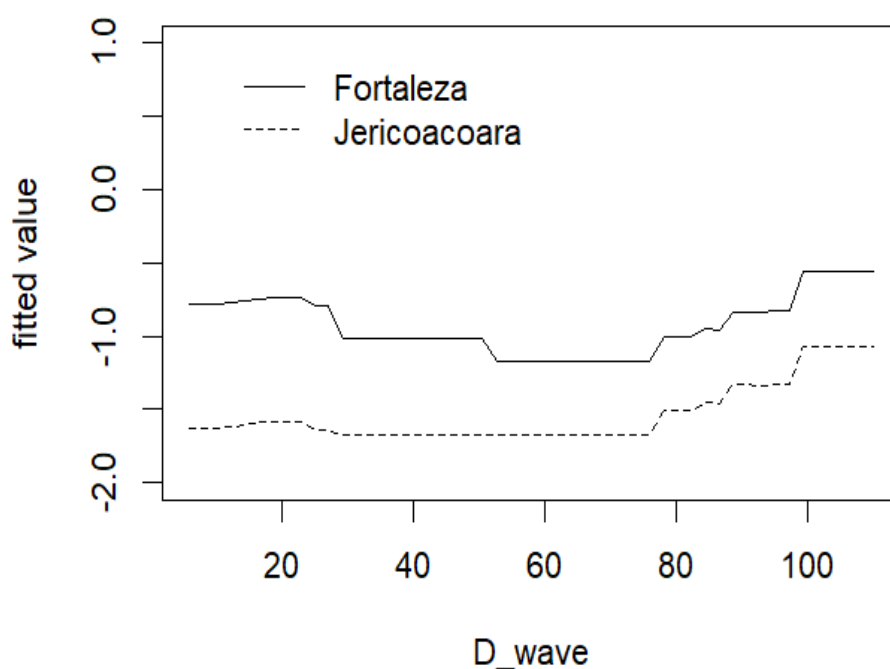


Fig. 2. Gráfico de dependência parcial gerado a partir de um modelo de *Boosted Regression Trees* (BRT). Ele ilustra a relação entre a variável preditora "D_wave" (direção das ondas) e o valor ajustado da densidade de

microplásticos (eixo y) em duas localidades: Fortaleza (linha sólida) e Jericoacoara (linha tracejada). O eixo x representa os ângulos da direção das ondas (em graus), enquanto o eixo y indica os valores ajustados (*fitted values*), que refletem a influência relativa dessa variável na densidade de microplásticos, considerando as demais variáveis constantes. O gráfico revela padrões específicos de acumulação para cada localidade. Em Fortaleza, observa-se maior variabilidade nos valores ajustados, sugerindo maior influência da direção das ondas na densidade dos MPs. Em Jericoacoara, a influência é mais uniforme, com menor variação ao longo das diferentes direções de onda.

No entanto, Fortaleza apresenta uma característica adicional não observada em Jericoacoara, a influência das ondas provenientes do Norte, com valores centrados em aproximadamente 0° a 30° , que incidem perpendicularmente à linha de costa. Esse padrão específico parece estar relacionado ao desenho geomorfológico da costa em Fortaleza e à presença de estruturas artificiais, como espigões e quebra-mares. Essas características atuam como barreiras físicas, favorecendo o represamento das massas de água e MPs, o que resulta em um acúmulo mais acentuado e na limitação da dispersão das partículas. Em contraste, Jericoacoara, com sua linha de costa natural e sem estruturas artificiais no mar, não apresenta condições propícias para esse tipo de acúmulo. James et al. (2025) demonstraram que as correntes costeiras são determinantes no transporte e acúmulo de microplásticos de acordo com padrões locais.

A interação entre a velocidade do vento (S_{wind}) e a altura das ondas (H_{wave}) foi a segunda mais relevante no modelo BRT, contribuindo com 4,34% para a variação na densidade de MPs. Ventos mais intensos (>15 Nós) estão associados a uma maior dispersão de partículas na superfície da água, resultando em valores ajustados mais negativos, o que sugere uma redistribuição horizontal mais eficiente. Por outro lado, em condições de ventos mais fracos (<10 Nós), os MPs tendem a se acumular, especialmente quando combinados com ondas de baixa altura ($<1,0$ m), gerando valores ajustados próximos de 0 (fig. 6).

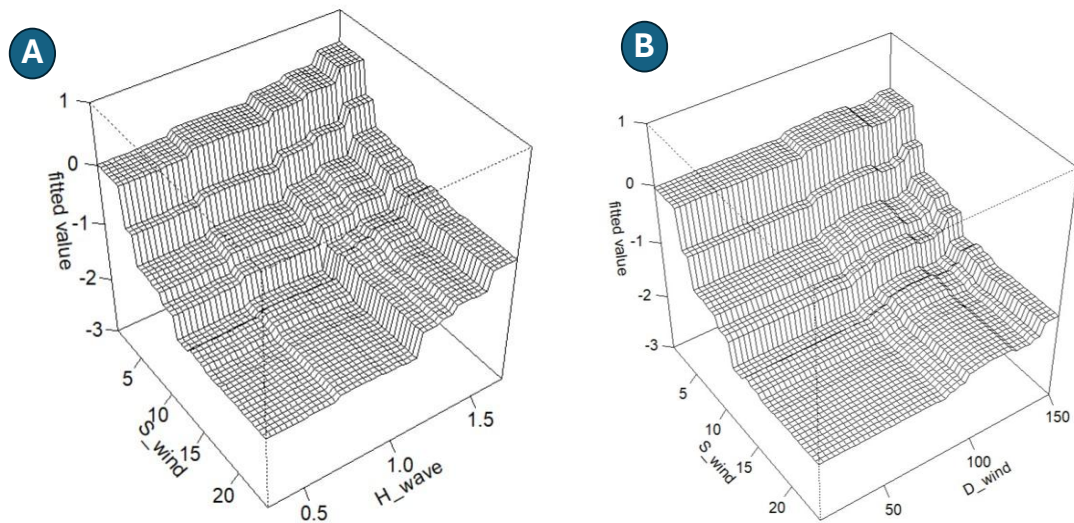


Fig. 3 Os gráficos tridimensionais apresentam as interações entre variáveis ambientais modeladas pelo Boosted Regression Trees (BRT), com valores ajustados da densidade de microplásticos (fitted value, eixo Z, variando de -3 a 1). (A) relação entre a velocidade do vento (S_wind, eixo X, variando de 0 a 20) e a altura das ondas (H_wave, eixo Y, variando de 0,5 a 1,5). (B) relação entre a velocidade do vento e a direção do vento (D_wind, eixo Y, variando de 0 a 150 graus).

A altura das ondas também desempenha um papel crucial. O modelo demonstra que ondas mais baixas favorecem o acúmulo de MPs devido à menor movimentação hidrodinâmica, enquanto ondas mais altas (>1,0 m) promovem uma redistribuição vertical e horizontal mais eficiente, contribuindo para a dispersão das partículas. A interação entre essas variáveis é particularmente evidente em cenários extremos: ventos fortes e ondas altas reduzem significativamente os *hotspots* de acúmulo, promovendo uma distribuição mais homogênea, enquanto ventos fracos e ondas baixas intensificam o acúmulo de MPs em áreas específicas.

A interação entre a velocidade do vento (S_wind) e a direção do vento (D_wind) foi a terceira mais relevante, contribuindo com 3,34% para a variação da densidade de MPs. A Figura 6 evidencia que ventos mais intensos (>15 Nós), independentemente da direção predominante, estão associados a uma menor densidade de MPs, refletindo a capacidade desses ventos de dispersar partículas na superfície da água e reduzir a formação de *hotspots* de acúmulo. No entanto, quando a velocidade do vento é baixa (<10 Nós), a direção do vento assume maior relevância. Ventos provenientes de direções entre 90° e 120°, alinhados às correntes costeiras

marinhas de leste, favorecem o transporte longitudinal de microplásticos na superfície das águas costeiras. Portanto, locais com maior intensidade de ventos e direção constante tendem a apresentar menor densidade de MPs devido à dispersão eficiente, enquanto áreas sujeitas a ventos fracos e variáveis podem se tornar *hotspots* de acúmulo.

A composição dos microplásticos (MPs) apresentou diferenças significativas entre Fortaleza e Jericoacoara, refletindo as distintas características ambientais e fontes de poluição de cada local (Figura7). Em Fortaleza, predominaram proporcionalmente fibras e MPs com cores intensas, como vermelho, preto e bege, associados principalmente a fontes urbanas e terrestres, influenciadas pela pluviosidade e pelos ventos que transportam esses materiais para o ambiente marinho. Por outro lado, Jericoacoara é caracterizada por uma maior ocorrência proporcional de fragmentos, glitter e pellets, além de MPs em tons claros, como branco, transparente e verde, que estão mais relacionados ao transporte por correntes e ondas. As correntes de superfície podem transportar MPs muito rapidamente (Zhang, 2017), por exemplo, trazendo resíduos plásticos de localidades da África para as praias do Parque Nacional Jericoacoara (Brabo et al., 2024). Assim, mesmo em uma unidade de conservação, os MPs encontrados não necessariamente refletem apenas as atividades locais, mas também a influência cumulativa de fatores regionais e globais nas regiões costeiras.

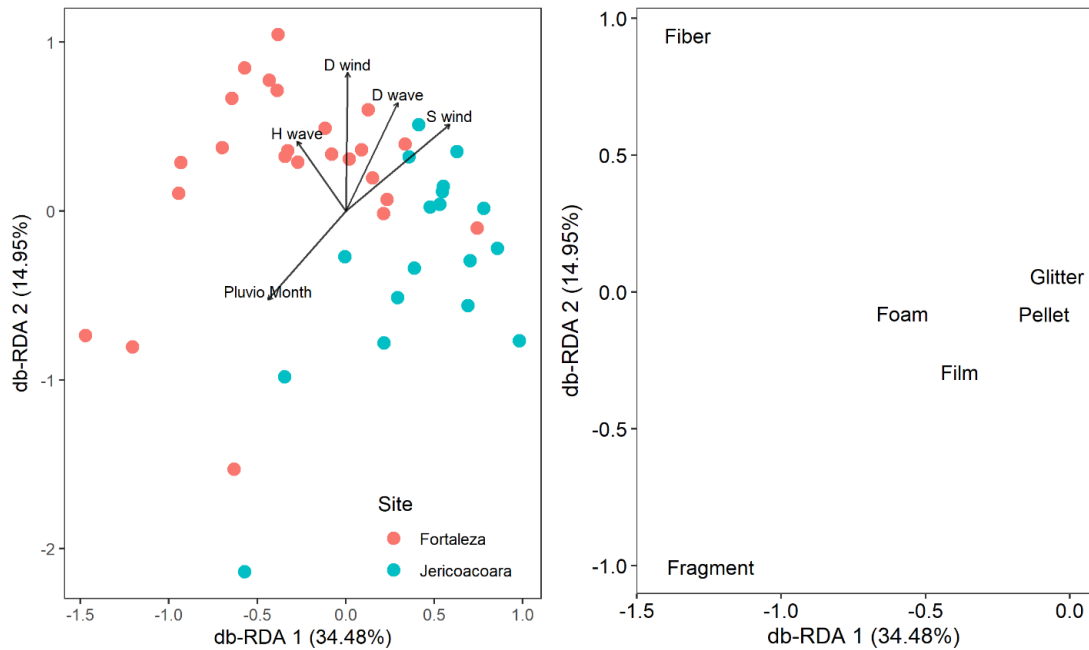


Fig. 4. A ordenação db-RDA apresenta a distribuição dos microplásticos (MPs) em Fortaleza e Jericoacoara com base nas suas formas. O eixo db-RDA 1 explica 34,48% da variação, enquanto o eixo db-RDA 2 explica 14,95%.

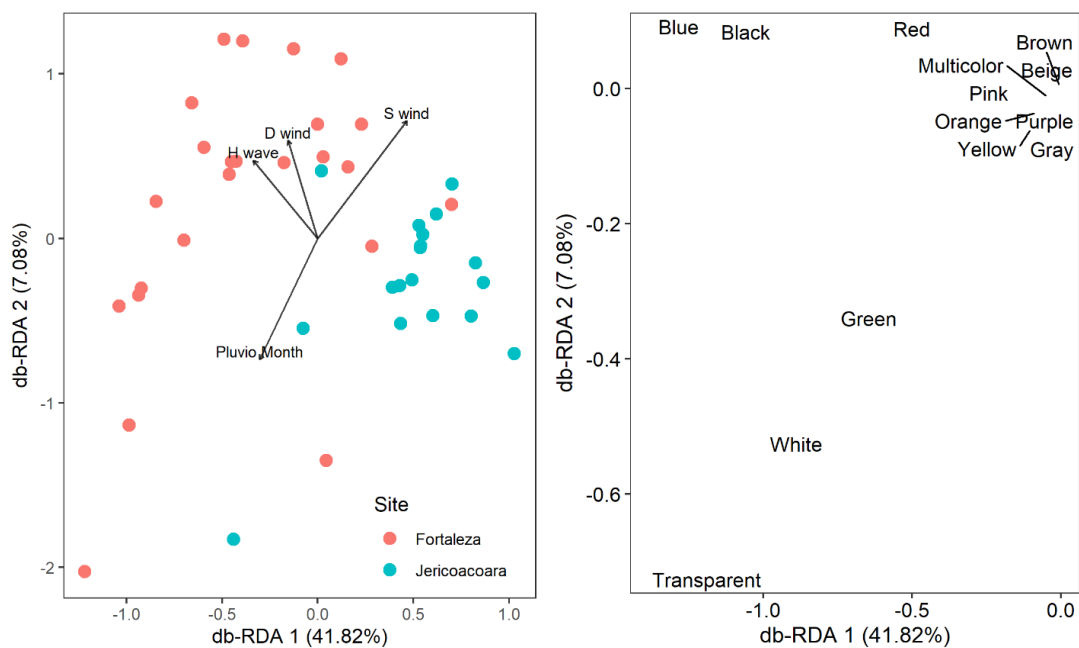


Fig. 5. Ordenação de db-RDA da distribuição dos microplásticos (MPs) em Fortaleza e Jericoacoara com base nas suas cores. O eixo db-RDA 1 explica 41,82% da variação, enquanto o eixo db-RDA 2 explica 7,08%.

Este estudo também demonstrou que a substituição de uma embarcação motorizada, equipada com motor de 15 HP, por uma canoa havaiana evitou a emissão de aproximadamente 295,68 kg de CO₂ na atmosfera ao longo do período de amostragem. Essa escolha não apenas reduziu o impacto ambiental do processo de

coleta mas também reafirmou o compromisso com métodos sustentáveis na pesquisa científica. A utilização de canoas havaianas revelou-se uma alternativa prática e de baixo custo, permitindo a obtenção de dados de qualidade ao longo de um período contínuo, além de envolver diretamente praticantes de esportes aquáticos na pesquisa científica. No Brasil, estima-se que existam mais de 200 bases de canoa havaiana, reunindo cerca de 7 mil praticantes, dos quais aproximadamente 3 mil participam ativamente de competições (Clube Náutico Cabo Frio, 2024). Esse amplo alcance da modalidade demonstra seu potencial para integrar ciência e esporte, fortalecendo iniciativas voltadas à compreensão dos impactos da poluição plástica e à proteção dos ecossistemas marinhos. O método empregado neste trabalho pode ser adaptado para diferentes regiões costeiras, contribuindo para esforços globais de monitoramento e controle da poluição por microplásticos.

2 LIMITAÇÕES

Este estudo apresentou algumas limitações relevantes que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A análise da composição polimérica dos microplásticos foi realizada com poucas amostras aproximadamente 12 devido à escassez de equipamentos disponíveis para pesquisa. Outro desafio metodológico esteve relacionado à medição da vazão da água com o uso de fluxômetro. Embora o equipamento tenha sido planejado para compor os arrastos, sua eficácia foi comprometida entre os meses de janeiro e março, quando foi registrada a presença de algas à deriva na superfície das águas. Essas algas se aderiam às hélices do aparelho, prejudicando o funcionamento e a precisão das medições. Além disso, a aplicação da metodologia está condicionada à disponibilidade de canoas havaianas, utilizadas para o arrasto superficial, restringindo a realização das coletas apenas às localidades que contam com clubes organizados que operam esse tipo de embarcação, como Fortaleza e Jericoacoara. Por fim, a possibilidade de contaminação das amostras permanece como um desafio constante, exigindo rigorosos cuidados durante todas as etapas de coleta, processamento e análise, a fim de minimizar interferências e garantir a confiabilidade dos dados obtidos.

REFERÊNCIAS

- Barnes, David K. A., et al., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 364 (1526), 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>.
- Botterell, Zara L. R., et al., 2019. Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: a review. *Environ. Pollut.* 245, 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.065>.
- Brabo, Lucio, et al., 2024. A transcontinental threat: plastic waste from Africa invades Brazil's coast. *Sci. Total Environ.* 954, 176599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176599>.
- Brewin, Robert J. W., et al., 2017. Expanding aquatic observations through recreation. *Front. Mar. Sci.* 4, 351. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00351>.
- Browne, Mark A., et al., 2007. Microplastic—an emerging contaminant of potential concern? *Integr. Environ. Asses. Manag.* 3 (4), 559-561. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630030412>.
- Camins, Elsa, et al., 2020. Paddle surfing for science on microplastic pollution. *Sci. Total Environ.* 709, 136178. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136178>.
- Clube Náutico Cabo Frio, 2019. Equipe de canoa havaiana Mana Brasil Clube Náutico conquista cinco medalhas no Estadual de Velocidade. <https://cncf.com.br/equipe-de-canoa-havaiana-mana-brasil-clube-nautico-conquista-cinco-medalhas-no-estadual-de-velocidade/>. (Acesso em 14 fevereiro 2025).
- Cowger, Win, et al., 2024. How many microplastics do you need to (sub)sample? *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 275, 116243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116243>.
- Critchell, Kay, et al., 2015. Modelling the fate of marine debris along a complex shoreline: lessons from the Great Barrier Reef. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 167, 414-426. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.10.018>.
- Elith, Jane, et al., 2008. A working guide to boosted regression trees. *J. Anim. Ecol.* 77 (4), 802-813. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x>.
- Galloway, Tamara S., et al., 2017. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nat. Ecol. & Evol.* 1 (5), 116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>.
- Gaylarde, Christine, et al., 2021. Plastic microfibre pollution: how important is clothes' laundering? *Heliyon* 7 (5), e07105. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07105>.

- Gaylarde, Christine, et al., 2023. The importance of biofilms on microplastic particles in their sinking behavior and the transfer of invasive organisms between ecosystems. *Micro 3* (1), 320-337. <https://doi.org/10.3390/micro3010022>.
- Godoy, Verônica, et al., 2019. The potential of microplastics as carriers of metals. *Environ. Pollut.* 255, 113363. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113363>.
- Gregory, Murray R., 1996. Plastic 'scrubbers' in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified. *Mar. Pollut. Bull.* 32 (12), 867-871. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(96\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(96)00047-1).
- Haan, William P., et al., 2022. Floating microplastic loads in the nearshore revealed through citizen science. *Environ. Res. Lett.* 17 (4), 045018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5df1>.
- James, Keziya, et al., 2025. Influence of precipitation and currents on the inter and intra-annual fluctuation in the distribution of microplastics in the coastal environment of Kochi, Eastern Arabian Sea, southwest coast of India. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 81, 103999. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103999>.
- Law, Kara Lavender, Thompson, Richard C., 2014. Microplastics in the seas. *Science*, 345, (6193), 144-145. <https://doi.org/10.1126/science.1254065>.
- Li, Kui, et al., 2024. Microplastic pollution as an environmental risk exacerbating the greenhouse effect and climate change: a review. *Carbon Res.* 3 (1), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00097-7>.
- Lorenz, Claudia, et al., 2019. Spatial distribution of microplastics in sediments and surface waters of the southern North Sea. *Environ. Pollut.* 252, 1719-1729. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.093>.
- Megha, Kizhakkepurakkal Balachandran, et al., 2025. Environmental impact of microplastics and potential health hazards. *Critical Reviews in Biotechnology*, 45 (1), 97-127. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2344572>.
- Mishra, Sunanda, et al., 2022. Detection, characterization and possible biofragmentation of synthetic microfibers released from domestic laundering wastewater as an emerging source of marine pollution. *Mar. Pollut. Bull.* 185, 114254. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114254>.
- Miyazono, Kentaro, et al., 2021. Large-scale distribution and composition of floating plastic debris in the transition region of the North Pacific. *Mar. Pollut. Bull.* 170, 112631. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112631>.
- Nhon, Nguyen Thi Thanh, et al., 2024. Microplastic pollution in coastal surface seawater of Southern Vietnam. *Environ. Monit. Assess.* 196 (11), 1077. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13243-4>.

- Pichler, Maximilian, Hartig, Florian, 2023. Machine learning and deep learning: a review for ecologists. *Methods Ecol. Evol.* 14 (4), 994-1016. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14061>.
- Ridgeway, Gray, et al., 2024. GBM: Generalized Boosted Regression Models (R package version 2.2.2). <https://CRAN.R-project.org/package=gbm>. (Acesso em 20 dezembro 2024).
- Sá, Luís Carlos de, et al., 2018. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: what do we know and where should we focus our efforts in the future? *Sci. Total Environ.* 645, 1029-1039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.207>.
- Singh, Rojalin Priyadarshini, et al., 2020. Synthetic microfibers: pollution toxicity and remediation. *Chemosphere* 257, 127199. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127199>.
- Tang, Li, et al., 2023. Global occurrence, drivers, and environmental risks of microplastics in marine environments. *J. Environ. Manage.* 329, 116961. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116961>.
- Thompson, Richard C., et al., 2004. Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304 (5672), 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.
- Thompson, Richard C., et al., 2024. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? *Science*, 386 (6720), eadl2746. <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>.
- United Nations Environment Programme, 2021. From pollution to solution: a global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>. (Acesso em 17 janeiro 2025).
- Vermeiren, Peter, et al., 2016. Sources and sinks of plastic debris in estuaries: a conceptual model integrating biological, physical and chemical distribution mechanisms. *Mar. Pollut. Bull.* 113 (1-2), 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.002>.
- Volgare, Michela, et al., 2021. Washing load influences the microplastic release from polyester fabrics by affecting wettability and mechanical stress. *Sci. Rep.* 11 (1), 19479. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98836-6>.
- Yamashita, Rei, Tanimura, Atsushi, 2007. Floating plastic in the Kuroshio Current area, western North Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* 54 (4), 485-488. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.11.012>.
- Zhang, Hua, 2017. Transport of microplastics in coastal seas. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 199, 74-86. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.032>.