



# DERIVA DE MICROPLÁSTICOS LEVES ORIUNDOS DOS EMISSÁRIOS DE IPANEMA E ICARAÍ NA BAÍA DE GUANABARA E ZONA COSTEIRA ADJACENTE

Anna A. C. Rosman

Paulo Cesar C. Rosman

Renato Carreira

**RESUMO:** O objetivo central desse estudo foi analisar a dispersão de microplásticos leves oriundos de emissários submarinos na Baía de Guanabara (BG) e zona costeira adjacente por meio de modelagem computacional. Foram escolhidos dois emissários para análise, o de Ipanema, localizado na zona costeira adjacente à baía, e o de Icaraí, localizado dentro da baía, próximo à embocadura. A modelagem foi realizada com apoio do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA<sup>®</sup>), considerando três meses de verão. Através dos resultados, verifica-se que, nos meses de verão, a maior parte da pluma do emissário de Ipanema (ESEI) é transportada para o oceano, porém uma parcela fica aprisionada em algumas regiões dentro da BG. Já a pluma do emissário de Icaraí (ESIca) tende a oscilar na direção Norte-Sul, de acordo com a maré, e é levada para fora da BG em caso de ventos mais intensos. Os microplásticos oriundos do ESICA também ficam aprisionados nas mesmas regiões que os do ESEI.

**PALAVRAS-CHAVE:** Microplásticos, Modelagem, Dispersão, Emissários

## INTRODUÇÃO

Em decorrência de seu amplo uso na manufatura de uma variedade de produtos, o plástico se tornou um material onipresente dentre os resíduos sólidos produzidos no mundo (Barnes et al., 2009). Apenas cerca de 9% de todo plástico produzido é reciclado (Geyer et al., 2017), sendo atualmente considerado um dos principais contaminantes ambientais, em especial nos oceanos (Rochman et al., 2013). Os diferentes polímeros usados na fabricação de plásticos apresentam diferentes graus de biodegradação, mas, em geral, esse tempo é de anos, ocasionando o acúmulo de plásticos em diferentes compartimentos ambientais, o que pode ameaçar a saúde humana e ambiental.

Nas últimas décadas, veio à tona a preocupação acerca de pequenas partículas de plástico, menores que 5 mm e muitas vezes invisíveis a olho nu, denominadas de microplásticos. Apenas na camada superficial dos oceanos, estimou-se que há 82 a 358 trilhões de partículas plásticas, pesando de 1.1 a 4.9 milhões de toneladas (Eriksen et al., 2023). O entendimento acerca da distribuição, zonas de acúmulo e destinos dos microplásticos nos oceanos ainda precisa ser ampliado (GESAMP, 2015). Logo, a utilização de modelagem hidrodinâmica computacional pode servir como uma ferramenta de análise que permite visualizar o transporte de partículas, assim como as zonas de acúmulo e deposição no espaço e no tempo. Com esse conhecimento em mãos, tem-se mais confiança para realizar previsões, e as ações de coleta e medição de concentrações podem ser mais bem direcionadas. O uso da modelagem para estudar o transporte de resíduos no ambiente marinho é um campo científico em crescimento, e é apontado como uma prioridade de pesquisa no caso dos microplásticos (GESAMP, 2015).

Isto posto, o presente trabalho faz uso da modelagem para analisar o transporte de microplásticos leves na Baía de Guanabara (BG) e zona costeira adjacente. Os microplásticos considerados leves são aqueles com flutuabilidade por terem densidade inferior à densidade da água do corpo receptor. A BG é considerada uma das baías mais importantes do Brasil, e é também uma das mais degradadas pelos impactos antrópicos relacionados à alta densidade demográfica e saneamento inadequado. Ela é uma importante via marítima, além de ser valiosa para atividades de pesca e turismo. Para mais, ainda estão localizadas em suas margens dois portos comerciais, uma refinaria de petróleo, estaleiros, marinas e dois aeroportos. Não obstante, ela ainda suporta um ecossistema consideravelmente biodiverso, possuindo então grande importância ambiental e ecológica.

Dessa forma, considerou-se dois emissários submarinos de esgoto como fontes de lançamento de microplásticos nesse estudo: o de Ipanema, localizado fora da BG, e o de Icarai, localizado dentro da BG. O lançamento de águas residuais em corpos d'água representa uma das vias de entrada de microplásticos nos oceanos (Browne et al., 2011). Microplásticos podem ser encontrados no esgoto bruto devido ao uso de produtos cosméticos que possuem microesferas de plástico em sua composição, que acabam entrando nas redes de esgoto, além de roupas produzidas com tecidos sintéticos, cujas fibras se desprendem no processo de lavagem. Mesmo com estações de tratamento, uma parcela relevante de microplásticos é capaz de escapar e ir parar eventualmente no mar.

Alguns estudos sobre microplásticos já foram realizados na BG, mas com enfoque em medições de concentrações. Portanto, a associação da hidrodinâmica para analisar a dispersão dos microplásticos na baía é uma área que precisa ser estudada, podendo trazer informações relevantes para auxiliar futuras pesquisas e ações de remediação.

## OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é analisar o transporte e a dispersão de microplásticos leves oriundos do ESEI – Emissário Submarino de Esgotos de Ipanema e do ESICA – Emissário Submarino de Icaraí, na Baía de Guanabara e zona costeira adjacente com suporte de modelagem hidrodinâmica computacional. Os objetivos específicos são:

Aplicar modelos de transporte Lagrangeano com o uso do SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, utilizando os emissários submarinos de Ipanema e Icaraí como fontes emissoras de partículas.

Verificar se a BG age como corpo receptor ou emissor de partículas de microplásticos leves, considerando o ESEI como uma fonte externa à baía, e o ESICA como uma fonte dentro da baía.

Identificar as regiões com maior probabilidade de acúmulo de microplásticos leves na BG, considerando apenas as partículas emitidas pelos emissários em questão.

## METODOLOGIA

A análise da dispersão de microplásticos na BG e zona costeira adjacente foi feita com auxílio de modelagem computacional através do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA® - [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br)). Trata-se de um sistema profissional de modelos computacionais registrado em nome UFRJ, com suporte do COPPE - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e da Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ. Desde 1987, o sistema vem sendo continuamente otimizado e ampliado através de diversos trabalhos, teses e projetos de pesquisa<sup>1</sup>.

Para as análises em questão, foi necessário fazer um modelo hidrodinâmico tridimensional e três modelos de transporte Lagrangeano. Em todos os modelos, adotaram-se vazões permanentes de 7,0 m<sup>3</sup>/s para o ESEI e de 1,5 m<sup>3</sup>/s para o ESICA, que são equivalentes a valores médios diários, segundo informes das companhias de saneamento que os operavam quando esse estudo foi realizado, respectivamente a CEDAE e a Águas de Niterói.

## Área de Interesse e Modelagem Digital do Terreno

Como ilustra a Figura 1, a área de estudo engloba toda a extensão da BG, incluindo trechos estuarinos de diversos rios, e uma parte da zona costeira adjacente. No mapa, a parte em branco contendo a malha representa o domínio de modelagem, para o qual foi feita a discretização e caracterização do terreno com dados de

<sup>1</sup> Amplos detalhes técnicos sobre o funcionamento do SisBaHiA®, incluindo tópicos sobre formulação matemática e numérica dos modelos, estão disponíveis em [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br).

batimetria e rugosidade de fundo. Nota-se que a área costeira externa à BG é relativamente pequena, englobando principalmente a região para leste do ESEI, uma vez que um dos interesses do estudo é observar se a BG importa a pluma do ESEI.

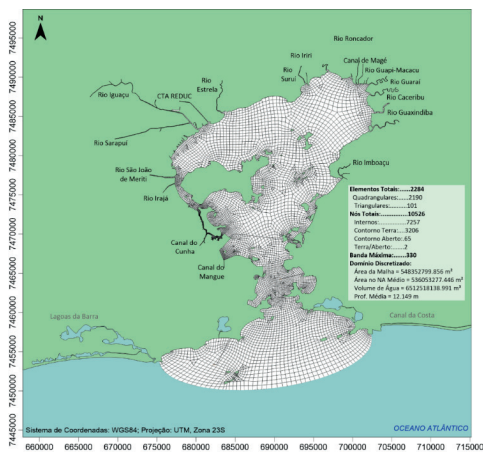


Figura SEQ Figura \\* ARABIC 1. Malha de discretização do domínio da modelagem para a Baía de Guanabara, com as informações resumidas dos dados da malha de discretização em elementos finitos.

A malha de elementos finitos utilizada nesse estudo foi desenvolvida por Andrade (2018). Os dados da malha estão expostos na Figura 1. A batimetria e rugosidade estão ilustradas na Figura 2. Para mais informações sobre os dados de batimetria e rugosidade, veja Andrade (2018).

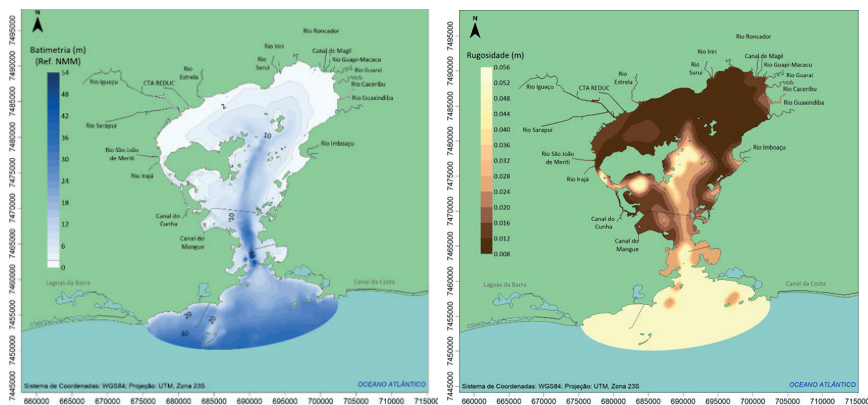


Figura SEQ Figura \\* ARABIC 2. À esquerda: Batimetria utilizada pelo modelo no domínio de modelagem, referida ao Nível Médio do Mar da Carta Náutica 1512 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (o NMM está na cota 0,69 acima do nível de redução da CN). À direita: Caracterização da amplitude da rugosidade do fundo.

## Modelo Hidrodinâmico

Modelos hidrodinâmicos calculam a circulação hidrodinâmica 3D e a promediada na vertical (2DH). Os modelos de escoamentos naturais em geometrias complexas são representados via discretização espacial com elementos finitos quadráticos e transformação sigma na vertical. Neste trabalho, utilizou-se um modelo 3D para calcular o campo de velocidades na camada superficial, responsável pelo transporte de microplásticos leves, que tendem a boiar. Usou-se como base o modelo hidrodinâmico desenvolvido e validado por Andrade (2018). Todos os dados de entrada são referentes à estação de verão, do dia 21/12/2016 ao dia 20/03/2017, conforme descritos por Andrade (2018). Maiores detalhes sobre a obtenção de dados - maré, correntes, vazões fluviais e ventos - e parametrização do modelo estão descritos em Andrade (2018).

## Modelo de Transporte Lagrangeano

O modelo de transporte Lagrangeano é utilizado para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas ou não, para camadas de escoamentos 3D ou 2DH. No caso dos microplásticos, não foi considerada nenhuma reação cinética nem de decaimento, visto que o período de modelagem é de apenas 3 meses.

Dado que os microplásticos leves boiam, considerou-se que eles ocupam uma camada com espessura média de meio metro junto à superfície livre. Por esta razão, o campo de velocidades utilizado para transporte das partículas de microplásticos leves foi obtido do modelo hidrodinâmico 3D, considerando as correntes em uma profundidade de 0,2 m a partir da superfície livre. Tal profundidade corresponde ao valor médio da espessura da camada superficial ocupada pelos microplásticos leves.

No modelo, é lançado um número de partículas na região fonte, em intervalos de tempo regulares, que são advectadas e dispersas pelas correntes turbulentas computadas pelo modelo hidrodinâmico. O volume emitido após cada intervalo de tempo é particionado no número de partículas lançadas.

Como o principal foco deste trabalho é analisar a dispersão das partículas e apresentar a modelagem computacional como metodologia de pesquisa do assunto, os valores de concentrações de microplásticos no esgoto são representativos de valores médios de medições. Porém, pequenas mudanças nos valores de concentração não alterariam significativamente o cálculo da dispersão através da modelagem.

Foram realizados três modelos para os microplásticos leves:

- Os dois emissários atuando como fontes emissoras de microplásticos;
- Apenas o ESEI atuando como fonte externa à BG;
- Apenas o ESIca atuando como fonte interna da BG.

A divisão em três modelos, tendo cada emissário como fonte única, foi feita para melhor analisar a deriva dos microplásticos oriundos de cada emissário em específico. Sendo assim, pode-se observar se a BG age como corpo receptor ou emissor de partículas, visto que o ESEI se encontra fora da Baía, enquanto o ESICA encontra-se dentro.

Como referência para os valores de concentração utilizados nos modelos, foi tomado o relatório de análise da concentração de microplásticos em esgoto bruto da ETE Foz Águas 05 de Deodoro, no Rio de Janeiro, desenvolvido por Martins (2017). Foram detectadas 0,19 g de microplásticos com tamanhos variando de 4,75 mm até 125 µm em 40 L de esgoto bruto, resultando em uma concentração equivalente de 4,75 mg/L. Vale ressaltar que esse valor se refere apenas às partículas com densidade inferior à 1,15 g/mL, que é a densidade da solução saturada de NaCl utilizada para fazer a separação por densidade do material. Logo, os microplásticos mais densos não foram considerados. Mais detalhes sobre os critérios de amostragem podem ser vistos em Martins (2017).<sup>2</sup>

Em relação ao tratamento do esgoto lançado pelo ESEI, há apenas um gradeamento grosseiro para reter resíduos sólidos e, em seguida, o esgoto é encaminhado para bombas centrífugas, que agem como um liquidificador e trituram o material sólido presente, segundo informações de técnico da CEDAE. Assim, pode-se concluir que a concentração de microplásticos no efluente do ESEI lançado ao mar pode ser ainda maior do que a concentração original no esgoto bruto. Isto posto, considerou-se no modelo a concentração de microplásticos flutuantes igual a 4,75 mg/L, como registrado no relatório de Martins (2017).

Já o esgoto lançado pelo ESICA recebe tratamento primário quimicamente assistido, realizado pela concessionária Águas de Niterói. Considerando o tratamento existente, adotou-se uma taxa de remoção de cerca de 70% (Sun, 2017) em relação ao dado de Martins (2017), resultando em uma concentração de 1,5 mg/L no efluente final.

Outro fator considerado no modelo é a absorção de partículas em zonas de praia. Isso é realizado através do coeficiente de absorção ( $c_A$ ) em fronteiras terrestres do modelo. O  $c_A$  refere-se à fração de massa que é absorvida no trecho da fronteira atingido, variando, portanto, entre valores de 0 a 1. Nesse trabalho, considerou-se um  $c_A$  de 0,05 para praias e mangues e 0 para costas rochosas e similares. Foi utilizado um valor baixo, pois, uma vez que a partícula tem toda sua massa absorvida, ela não retorna à água. Entretanto, isso não acontece no caso real dos microplásticos, que podem se depositar em praias e eventualmente se desprender, retornando ao mar. Esse efeito pode ser considerado na modelagem, mas não foi incluído nas análises deste artigo.

<sup>2</sup> Com relação às medições, destaca-se que o foco deste trabalho é apresentar a modelagem como metodologia de avaliação, os valores de concentração podem ser relativizados.



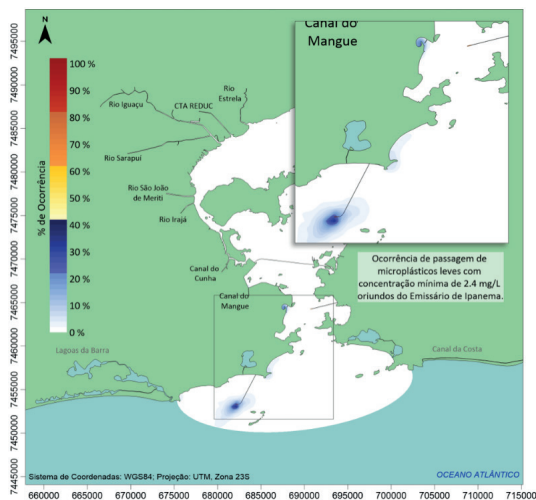


Figura SEQ Figura \\* ARABIC 4. Ocorrência de passagem de microplásticos leves com concentração mínima de 2,4 mg/L oriundos do ESEI, com destaque para as regiões de acúmulo.

Já em relação à pluma oriunda do ESICA, percebe-se que ela é mais influenciada pelas correntes de maré, fazendo com que fique, na maior parte do tempo, na região do canal da BG, oscilando na direção Norte-Sul, como ilustrado na Figura 5. Dependendo das condições de vento, os microplásticos vão se acumulando e são eventualmente transportados para fora da Baía (Figura 7). Assim como no caso do ESEI, a região da Marina da Glória também acumula partículas oriundas do ESICA, com percentuais de ocorrência de 60% a 70% para concentrações mínimas de 0,75 mg/L, equivalente à metade da concentração do efluente lançado, cf. Figura 6. As regiões da enseada de Botafogo, do Canal do Cunha e Canal do Mangue acumulam ainda mais microplásticos oriundos do ESICA do que do ESEI, o que faz sentido devido à maior proximidade. A região que engloba a Praia do Diabo e o Forte de Copacabana também teve destaque.

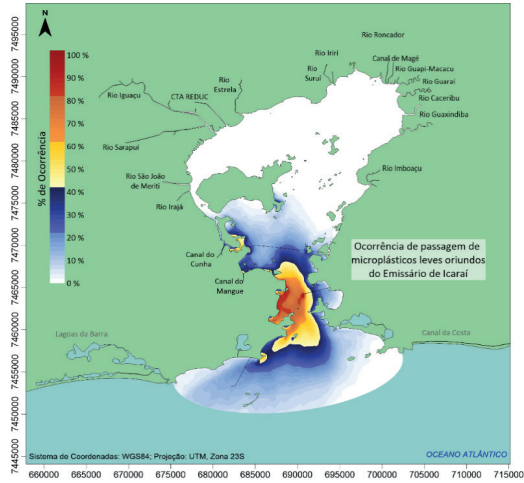


Figura SEQ Figura \\* ARABIC 5. Ocorrência de passagem de microplásticos leves oriundos do ESIca, independente de valores de concentração.

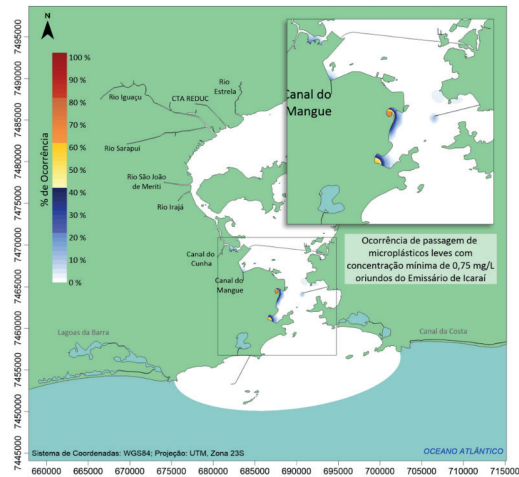


Figura SEQ Figura \\* ARABIC 6. Ocorrência de passagem de microplásticos leves com concentração mínima de 0,75 mg/L oriundos do ESIca, com destaque para as regiões de acúmulo.

A dispersão dos microplásticos leves em diferentes condições de ventos e marés pode ser observada na Figura 7. Observa-se que a concentração na BG varia muito, dependendo das condições, principalmente em relação aos ventos. Ao observar as imagens, fica bem claro como a direção predominante da pluma coincide com a do vento naquele instante. Na maré vazante, a maior parte das partículas é levada para fora da BG, ficando uma parte retida nas zonas de acúmulo já identificadas.

Os resultados em seis instantes estão apresentados na Figura 7 e são referentes à maré de sizígia. Seguem abaixo as informações quanto aos ventos em estação externa à BG, em ângulos azimutais em relação ao Norte verdadeiro:

81°, ~ 6,7 m/s;

107°, ~ 0,7 m/s;

192°, ~ 4,2 m/s;

116°, ~ 4,0 m/s;

64°, ~ 9,4 m/s;

176°, ~ 1,0 m/s.

É notável a absorção de partículas oriundas dos emissários em algumas praias do domínio. Ademais, percebe-se que, mesmo em instantes em que a pluma do ESEI está sendo levada para o oceano, como no quadro 5 da Figura 7, existem partículas oriundas desse emissário aprisionadas nas regiões de acúmulo dentro da BG.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados analisados, observa-se que as partículas oriundas dos emissários não chegam à porção mais ao Norte da BG, dificilmente ultrapassando a Ilha do Governador. Isso não significa que as águas dessa região não devam transportar microplásticos, uma vez que elas recebem as vazões dos rios.

Também puderam ser identificadas cinco regiões críticas, que o modelo apontou como mais relevantes para a presença de microplásticos leves na água. Dessa forma, é de interesse que sejam realizadas coletas preferencialmente nessas regiões, de modo também a validar as informações obtidas através da modelagem. Não necessariamente, essas regiões são as regiões com as maiores concentrações de microplásticos na BG. Os resultados indicam apenas que elas são as regiões que mais recebem os microplásticos leves oriundos dos emissários. São elas:

1. Marina da Glória;
2. Enseada de Botafogo
3. Canal do Cunha
4. Canal do Manguê
5. Praia do Diabo e Forte de Copacabana

Através dos resultados do modelo, pode-se concluir que a BG atua tanto como receptora, quanto como emissora de microplásticos leves. Os resultados mostraram que uma parcela dos microplásticos leves oriundos do ESEI, localizado fora da BG, tende a ficar aprisionada em regiões dentro da baía. Enquanto isso, grande parte da pluma do ESIca, além de se acumular nas mesmas regiões, é transportada para fora da baía.

Vê-se que o uso da modelagem como ferramenta para análise da dispersão de microplásticos tem um grande potencial, ao oferecer uma visualização de sua movimentação nas águas ao longo do tempo. Posto isso, ela pode servir como base para o planejamento de campanhas de campo. Para uma análise ainda mais abrangente, é necessário levar em consideração os microplásticos densos, assim como outras possíveis fontes emissoras, como rios, canais e praias na BG e zona costeira adjacente.

Vale ressaltar, porém, que a análise de microplásticos no ambiente traz muitos desafios que não foram considerados a fundo neste estudo. As partículas de microplástico apresentam uma heterogenicidade muito grande em relação a tamanho, formato, densidade e composição química, o que afeta diretamente seu transporte na coluna d'água (Kaimathurthy et al., 2025).

Outro empecilho apontado pela literatura recente é a falta de dados observacionais de longa duração e específicos ao local analisado, o que prejudica o realismo das modelagens. Isso cria um ciclo de retroalimentação prejudicial: o desenvolvimento e aprimoramento de modelos são severamente limitados pela escassez de dados, enquanto a dificuldade e o custo da coleta de dados são agravados pela ausência de requisitos claros, orientados por modelos, sobre quais dados são mais úteis. Isso revela um gargalo fundamental no avanço da modelagem do transporte de microplásticos (Kaimathurthy et al., 2025).

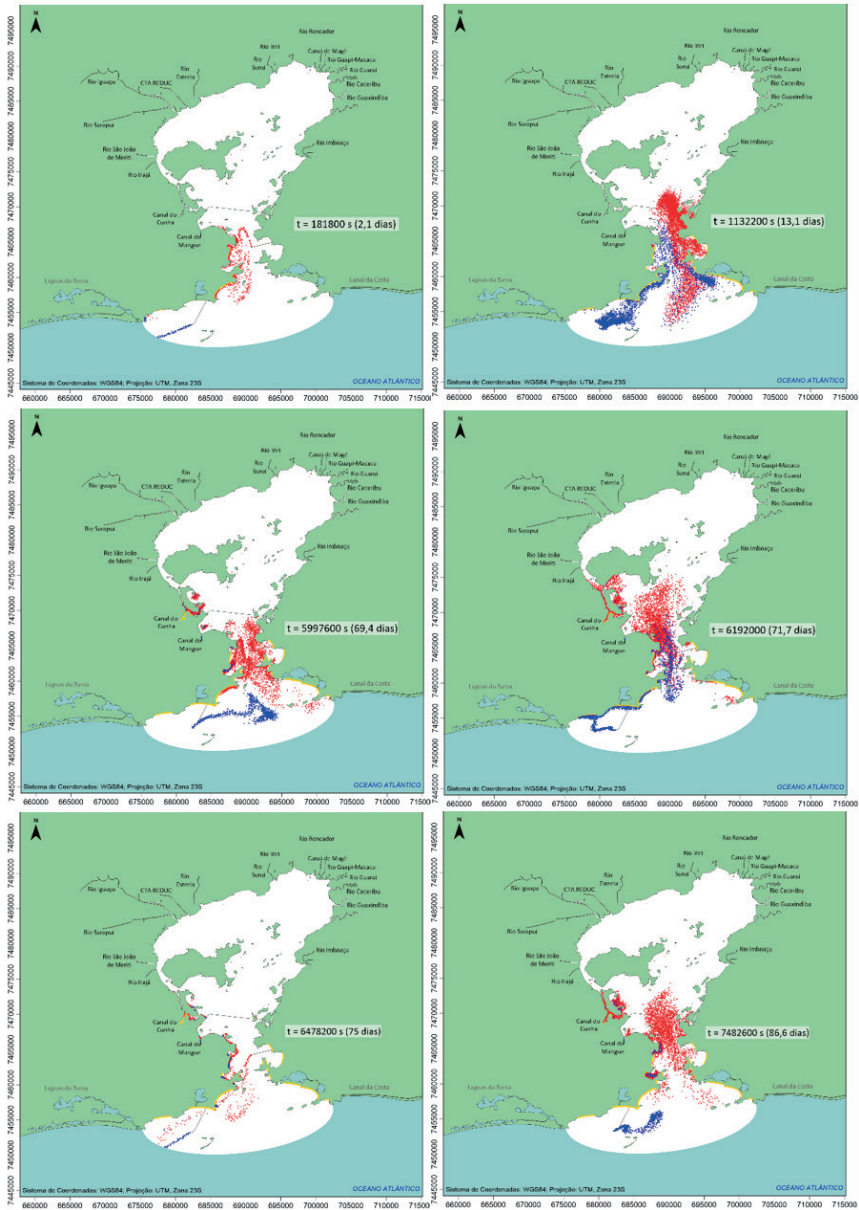


Figura 7. Ocupação das plumas de microplásticos leves oriundos dos dois emissários de diferentes condições de ventos e marés. As partículas vermelhas são oriundas do ES1ca, as azuis do ESE1 e as amarelas representam as partículas absorvidas em praias e mangues. As figuras estão numeradas pela ordem temporal

## REFERÊNCIAS

- Andrade, V. S. Modelagem da dispersão de microplásticos na Baía de Guanabara e zona costeira adjacente. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em < <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/602-msc-pt-2018/9025-veronica-silveira-de-andrade-dissertacao> >
- Barnes, D. K. A.; Galgani, F.; Thompson, R. C.; Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, v. 364, n. 1526, p. 1985-1998, 2009.
- Browne, M. A.; Galloway, T. S.; Thompson, R. C. Spatial Patterns of Plastic Debris along Estuarine Shorelines. *Environmental Science & Technology*, 2010.
- Eriksen M, Cowger W, Erdle LM, Coffin S, Villarrubia-Gómez P, Moore CJ, et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18(3):e0281596, 2023. Disponível em <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>>
- GESAMP. Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: A Global Assessment. *Rep. Stud. GESAMP*, v. 90, p. 96, 2015.
- Geyer, R.; Jambeck, J.; Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, 2017.
- Kaimathuruthy, B. J.; Jalón-Rojas, I.; Sous, D. Modelling Microplastic Dynamics in Estuaries: A Comprehensive Review, Challenges and Recommendations. *EGUsphere* [preprint], 2025.
- Martins, M. C. T. Avaliação da presença de microplásticos em efluente gerado por estação de tratamento de esgoto (ETE). Departamento de Química, PUC Rio, 2017.
- Rochman C. M.; Browne, M. A.; Haplern, B. S.; Hentschel, B. T.; Hoh, E.; et al. Classify plastic waste as hazardous. *Nature*, v. 494, p. 169-171, 2013.
- Sun, J.; Dai, X.; Wang, Q.; van Loosdrecht, M. C. M.; Ni, B.-J. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*, v. 152, p. 21-37, 2019.