



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA - PPGOC**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA  
SIMULAÇÃO DE TRANSPORTE DE RESÍDUO PLÁSTICO  
EM ESTUÁRIO AMAZÔNICO**

**Dissertação apresentada por:**

**MATHEUS PAMPLONA SANTIAGO**

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic (UFPA)**

**Coorientadora: Dra. Thaís Angélica da Costa Borba (UFPA)**

---

**BELÉM – PARÁ  
2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA - PPGOC**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA  
SIMULAÇÃO DE TRANSPORTE DE RESÍDUO PLÁSTICO  
EM ESTUÁRIO AMAZÔNICO**

**Dissertação apresentada por:**

**MATHEUS PAMPLONA SANTIAGO**

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic (UFPA)**

**Coorientadora: Dra. Thaís Angélica da Costa Borba (UFPA)**

**BELÉM - PARÁ  
2024**

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S235d Santiago, Matheus Pamplona.  
Desenvolvimento de modelo matemático para simulação de transporte de resíduo plástico em estuário amazônico / Matheus Pamplona Santiago. — 2024.  
xiv, 67 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Rollnic  
Coorientação: Dra. Thaís Angélica da Costa Borba

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em  
Oceanografia, Belém, 2024.

1. Resíduos Plásticos. 2. Rio Urbano. 3. Delft-3D. 4. Baía do Guajará. I. Título.

CDD 363.728098115

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Oceanografia**

# **DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE TRANSPORTE DE RESÍDUO PLÁSTICO EM ESTUÁRIO AMAZÔNICO.**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

**MATHEUS PAMPLONA SANTIAGO**

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Oceanografia na Área de Sistemas Costeiros e Oceânicos. Linha de Pesquisa: Processos em Sistemas Costeiros e Oceânicos.**

**Data de Aprovação: 28 /05/ 2024**

**Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCELO ROLLNIC  
Data: 21/08/2024 22:22:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Marcelo Rollnic**  
(Orientador – UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** THAIS ANGELICA DA COSTA BORBA  
Data: 19/08/2024 09:22:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Dra. Thais Borba**  
(Coorientadora – UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCIO MACHADO CINTRA  
Data: 19/08/2024 14:13:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Marcio Cintra**  
(Membro externo – UFRN)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** SURY DE MOURA MONTEIRO  
Data: 21/08/2024 13:06:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dra. Sury de Moura Monteiro**  
(Membro interno – UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RENAN PEIXOTO ROSARIO  
Data: 19/08/2024 10:00:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário**  
(Membro interno – UFPA)

Dedico este trabalho à minha mãe e ao meu irmão, pelo apoio incondicional.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pelas vitórias conquistadas até aqui e por ter me dado forças para continuar diante de cada obstáculo surgido, até o presente momento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, a qual contribuiu para a realização e conclusão deste trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho – LAPMAR e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia - PPGOC, por todo o suporte e apoio prestado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Rollnic, pela dedicação e paciência. Obrigado por ter contribuído com meu processo de aprendizagem, compartilhando seus conhecimentos acadêmicos.

Agradeço à minha coorientadora Thais Borba, pelas orientações e acompanhamento ao longo desta jornada.

Aos amigos de Turma, em especial à Lorena e Cássia, obrigado pela parceria e momentos de descontração e companheirismo.

Aos companheiros de Laboratório – e.g., Maurício, Carolina Cidon, Leandrino, Yuri, Adriel, Marco e Ana. A todos que de alguma forma (desde a graduação) contribuíram para este trabalho, seja pela inspiração profissional, seja por algum processamento nos dados.

Ao Comandante do 10 Batalhão de Polícia Militar, Ten. Cel. Jerônimo, e ao Subcomandante Cap. Sodré, pelo incentivo aos estudos e, conseqüentemente, retorno ao Mestrado. Estendo também aos meus companheiros de trabalho da sessão (especialmente o P4).

Aos meus familiares, em especial à minha mãe Lucilena Rodrigues Pamplona, ao meu irmão Marllon Pamplona Santiago e à minha esposa Yasmim Oliveira, pelo apoio incondicional nos momentos mais difíceis.

Às minhas Filhas Laurinha e Alicinha, por recarregarem minhas forças no retorno para casa após exaustivas horas de trabalho. À minha irmã Bia pela ajuda com a revisão ortográfica.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma maneira, seja direta e/ou indiretamente, para a conclusão desta dissertação.

*“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”*

*(Isaac Newton)*

## RESUMO

O crescente uso de plásticos tem gerado preocupações ambientais devido à persistência desses materiais nos ecossistemas marinhos. Estima-se que trilhões de detritos plásticos estejam atualmente nos oceanos, com milhões de toneladas adicionais ingressando anualmente por meio de rios e outras fontes terrestres. Há uma lacuna entre os modelos de entrada de plástico nos oceanos e as observações de campo, indicando a necessidade de abordagens e simulações mais precisas baseadas em dados *in-situ*. A Zona Costeira Amazônica (ZCA) surge como um ponto crítico para o acúmulo de resíduos plásticos, especialmente em áreas vegetadas próximas a grandes centros urbanos. Embora vários modelos numéricos tenham sido desenvolvidos para a ZCA, nenhum abordou o transporte de resíduos plásticos até o momento. Este estudo pioneiro implementou a primeira simulação matemática para o transporte de plástico em um estuário urbano da costa amazônica, especificamente na Baía do Guajará. O rio urbano da Tamandaré foi escolhido como local de lançamento devido à disponibilidade de dados *in-situ* para a parametrização dos plásticos que entram na Baía. O modelo hidrodinâmico (D-Flow), validado pelo grupo de modelagem ambiental do LAPMAR, e o módulo de qualidade de água (D-Waq), foram implementados com o software Delft-3D. Os resultados mostram que a Baía do Guajará é mais sensível à contaminação por plásticos durante o período seco, caracterizado por um lento transporte de massas d'água e uma reduzida capacidade de renovação do sistema. Em contraste, no período chuvoso, a tendência é para a exportação de plásticos, devido à maior capacidade de renovação do ambiente. O tempo de residência das águas do rio Tamandaré na baía varia de aproximadamente 8,28 dias no período de maior descarga a 31,76 dias no período de menor descarga, permitindo estimar que os resíduos lançados pelo Tamandaré podem alcançar o Oceano Atlântico Tropical em um intervalo de 36 a 63 dias, dependendo da estação sazonal. O estudo conclui que estuários amazônicos com marés assimétricas positivas favorecem a importação de resíduos no período de menor vazão e aumentam a exportação no período de maior vazão. Foram observadas zonas temporárias de retenção de plásticos em ambos os períodos sazonais para as regiões marginais de baixa energia e morfologia atípica, como a orla próxima ao porto de Belém (BG1) e a foz do rio Guamá (RG). Essas zonas de retenção são intensificadas no período seco e atenuadas no período chuvoso, conforme a variabilidade hidrodinâmica local. Embora o estudo tenha analisado a dinâmica resultante do aporte de plásticos em uma única maré vazante, não considerou o fluxo contínuo e o potencial acúmulo de plásticos ao longo do tempo. Este trabalho representa um passo inicial importante para melhorar a compreensão e a metodologia do transporte de plásticos na ZCA.

**Palavras-chave:** resíduos plásticos, rio Urbano, Delft-3D, Baía do Guajará.

## ABSTRACT

The increasing use of plastics has raised environmental concerns due to the persistence of these materials in marine ecosystems. It is estimated that trillions of pieces of plastic debris are currently in the oceans, with millions of additional tons entering annually through rivers and other terrestrial sources. There is a gap between models of plastic input to the oceans and field observations, indicating the need for more accurate approaches and simulations based on in-situ data. The Amazon Coastal Zone (ACZ) emerges as a hotspot for the accumulation of plastic waste, especially in vegetated areas close to large urban centers. Although several numerical models have been developed for the ACZ, none have addressed the transport of plastic waste to date. This pioneering study implemented the first mathematical simulation for plastic transport in an urban estuary on the Amazon coast, specifically in the Guajará Bay, using the urban river (Tamandaré river) as a release site due to the availability of in-situ data for plastic parameterization. The hydrodynamic model (D-Flow), validated by the LAPMAR environmental modeling group, and the water quality module (D-Waq), were implemented using the Delft-3D software. The results show that Guajará Bay is more sensitive to plastic contamination during the dry period, characterized by slow transport of water masses and a reduced capacity for renewal. In contrast, during the rainy season, the tendency is to export plastics, due to the system's greater capacity for renewal. The residence time of the waters of the Tamandaré River in the bay varies from approximately 8.28 days in the period of greatest discharge to 31.76 days in the period of lowest discharge, allowing us to estimate that the waste released by the Tamandaré can reach the Tropical Atlantic Ocean in a range of 36 to 63 days, depending on the seasonal season. The study concludes that Amazon estuaries dominated by positive asymmetric tides favor the import of waste during periods of lower flow and increase exports during periods of higher flow. Temporary plastic retention zones were observed in both seasonal periods for marginal regions of low energy and atypical morphology, such as the coastline close to the port of Belém (BG1) and the mouth of the Guamá River (RG). These retention zones are intensified in the dry season and attenuated in the rainy season, depending on local hydrodynamic variability. Although the study analyzed the dynamics resulting from the input of plastics in a single ebb tide, it did not consider the continuous flow and potential accumulation of plastics over time. This work represents an important initial step towards improving the understanding and methodology of plastics transport in the ACZ.

**Keywords:** plastic waste; Urban river, Delft-3D, Guajará Bay.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Localização da área de estudo. Fonte: O autor ..... 6
- Figura 2- Zona Costeira Paraense segmentada em 5 setores: 1) Marajó Ocidental; 2) Marajó Oriental; 3) Continental Estuarino; 4) Flúvio-Marítimo; 5) Costa Atlântica Paraense. Fonte: Semas (2020). ..... 7
- Figura 3- Modelo de caixa que representa a vazão do estuário do RP e seus principais contribuintes. Fonte: Prestes *et al.* (2020)..... 8
- Figura 4- Sub-bacia Guamá-Moju e suas principais drenagens. Fonte: Gregório & Mendes (2009). ..... 9
- Figura 5- A figura mostra os depósitos de sedimentos lamosos e a distribuição das marés de enchente, que adentram predominantemente pela margem direita da Baía do Guajará, onde se encontram com a corrente de final de vazante do canal da ilha das Onças, na margem esquerda da Baía. Fonte: Gregório (2008). ..... 10
- Figura 6- Variação do nível d'água ao longo de 36 dias de fundeio no trapiche da UFPa (foz do rio Guamá), a menos de 7km da Baía do Guajará, sob uma frequência amostral de 1 dado a cada 10 minutos. Fonte: O autor, com base no banco de dados do Lapmar. 11
- Figura 7- Valores médios de Vazão ( $m^3/s$ ) e Corrente (m/s) ao longo de 12h referente ao transecto realizado na Baía do Guajará, no período seco, para a calibração do modelo hidrodinâmico. Fonte: O autor, com base no acervo do Lapmar. .... 11
- Figura 8- Localização da Bacia Hidrográfica da Tamandaré. Fonte: Nylander (2019). ..... 12
- Figura 9- Mapa de Belém e suas respectivas fases de urbanização: 1) fase ribeirinha - desde a fundação de Belém até meados do século XVIII; 2) fase de penetração – início do século XIX; e 3) fase de continentalização – a partir da metade do século XIX. Fonte: Abelém (2018). ..... 14
- Figura 10- Reconstituição dos bairros Cidade e Campina, separados pelo Alagado do Piri, na formação histórica da malha urbana de Belém – século XVII. Fonte: Penteadó (1968) *apud* Brito (2007). ..... 15

- Figura 11- Domínio do modelo hidrodinâmico que abrange toda a extensão do estuário do rio Pará. Fonte: O autor. .... 18
- Figura 12- a) Discretização dos canais e rios ao redor da ilha onde encontra-se a cidade de Barcarena; b) Decomposição da malha, evidenciando a 2ª etapa do modelo: desenvolvimento da malha nas resoluções de 500, 100, 20 e 4m. Fonte: O autor... 18
- Figura 13- Batimetria interpolada para todo o domínio do modelo com base nas diferentes fontes de dados. Fonte: Lapmar (2023). .... 20
- Figura 14- Pontos utilizados para a calibração da variação de superfície livre (maré, em metros) no modelo. Fonte: Adaptado de Lapmar (2023). .... 22
- Figura 15- Seções utilizadas para a calibração da descarga (vazão, em m<sup>3</sup>/s) no modelo. Fonte: Lapmar (2023). .... 22
- Figura 16- Localização da foz do rio Tamandaré (círculo vermelho), na margem direita da Baía do Guajará, onde ocorreu o lançamento de resíduos plásticos e das parcelas de água para inferir o tempo de residência. .... 29
- Figura 17- Localização dos pontos de observações para os cenários de idade da água: Alça Viária - ALÇA; foz do Rio Guamá - RG; Baía do Guajará, próximo a foz do rio Tamandaré- BG; e Foz da Baía do Guajará – BGF. Fonte: O autor. .... 32
- Figura 18- Localização do ponto de lançamento (seta verde) dos resíduos nos cenários 3, 4, 5 e 6, e os seus respectivos pontos de observações: foz do Rio Guamá - RG; Baía do Guajará, próximo ao porto de Belém- BG1; Baía do Guajará, próximo ao canal do Una – BG2, Foz da Baía do Guajará – BGF. .... 33
- Figura 19- Escala de tempo para a renovação das águas iniciais presentes no modelo, inferida com base no tempo de lavagem da concentração do traçador conservativo durante o período chuvoso, referente: a) ao dia zero (anterior ao início da simulação); b) após 6 dias de simulação; c) após 24 dias de simulação (zoom); e d) após 64 dias (zoom). Imagens capturadas próximo a preamar. Fonte: O autor. .... 35

- Figura 20- Escala de tempo para a renovação das águas iniciais presentes no modelo, inferida com base no tempo de lavagem da concentração do traçador conservativo durante o período seco, referente: a) ao dia zero (anterior ao início da simulação; b) após 6 dias de simulação; c) após 24 dias de simulação (zoom); e d) após 64 dias (zoom). Imagens capturadas próximo a preamar. Fonte: O autor. ....36
- Figura 21- Variabilidade temporal dos valores de idade (AgeTR1) da água continental, em (dias), calculada através do lançamento de um traçador conservativo (cTR1) e decadencial (dTR1), em (g/m<sup>3</sup>), durante o período chuvoso (a) e seco (b), ao longo de 64 dias de simulação. Os pontos de controle são: ALÇA; b) RG; c) BG; d) BGF. Fonte: O autor. ....38
- Figura 22- Variabilidade espaço-temporal dos valores de cada traçador: a) traçador conservativo (CTR1) e b) traçador decadencial (DTR1) – a seta vermelha indica as fronteiras de aporte desses traçadores; bem como o cálculo de idade da água continental: c) visão macro – zoom-out d) área de estudo - zoom-in. Todas as figuras foram geradas próximo a preamar no período chuvoso, após 64 dias de simulação. Fonte: O autor. ....39
- Figura 23- Variabilidade espaço-temporal dos valores de cada traçador: a) traçador conservativo (CTR1) e b) traçador decadencial (DTR1) – a seta vermelha indica as fronteiras de aporte desses traçadores; bem como o cálculo de idade da água continental: c) Zoom macro d) zoom-in. Todas as figuras foram geradas próximo a preamar durante o período seco, após 64 dias de simulação. Fonte: O autor. ....40
- Figura 24- Na parte superior: Série temporal da idade da água no ponto de observação euleriano localizado na foz da Baía do Guajará (BGF) ao longo de 64 dias de simulação, no período chuvoso. Na parte inferior: Variabilidade espaço-temporal da idade da água oriunda de uma fonte pontual, por meio do lançamento de um par de traçadores (conservativo e decadencial) na foz do rio Tamandaré (seta preta), aportados constantemente durante o período chuvoso, ao longo de 64 dias de simulação. Fonte: O autor.....42

- Figura 25- Na parte superior: Série temporal da idade da água no ponto de observação euleriano localizado na foz da Baía do Guajará (BGF) ao longo de 64 dias de simulação, no período seco. Na parte inferior: Variabilidade espaço-temporal da idade da água oriunda de uma fonte pontual, por meio do lançamento de um par de traçadores (conservativo e decadencial) na foz do rio Tamandaré (seta preta), aportados constantemente durante o período seco, ao longo de 64 dias de simulação. Fonte: O autor. ....43
- Figura 26- Mapa espaço-temporal da idade da água desde a foz do rio Tamandaré até sua saída do sistema pela Foz da Baía do Guajará, do rio Pará e, conseqüentemente, desaguando no Oceano Atlântico Tropical. A parte superior da figura representa o período chuvoso e a parte inferior o período seco. Fonte: O autor.....44
- Figura 27- Variabilidade temporal dos pontos de observações eulerianos para acompanhar a concentração do plástico ao longo do período chuvoso (esquerda) e seco (direita), em maré de sizígia. Fonte: O autor. ....46
- Figura 28- Variabilidade temporal dos pontos de observações eulerianos para acompanhar a concentração do plástico ao longo do período chuvoso (esquerda) e seco (direita), em maré de sizígia. Fonte: O autor. ....48
- Figura 29- Mapa de identificação das zonas de retenção de resíduos plásticos (sumidouros); representação da preferência de fluxo (embora bidirecional); e batimetria (em metros) ao longo do rio Guamá e Baía do Guajará, com a localização geográfica da linha de costa em BG1 (NE-SW - linha vermelha) e BG2 (N-S - linha amarela) em relação aos canais principais de escoamento (direção N-S – canal do meio e das onças). Fonte: O autor.....49
- Figura 30- Variabilidade espaço temporal da pluma de transporte advectivo-dispersivo do plástico durante 4 dias, ao longo do período chuvoso (porção superior da Figura) e seco(Porção inferior da Figura), em condição de preamar de sizígia. Fonte: O autor. ....51

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	iv
AGRADECIMENTOS .....	v
EPIGRAFE .....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT .....	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	ix
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MODELAGEM EM ESTUÁRIO AMAZÔNICO .....	3
1.2 JUSTIFICATIVA .....	4
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>6</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	6
<b>3.1.1 Aspectos Socioeconômicos .....</b>	<b>12</b>
3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO .....	17
<b>3.2.1 Hidrodinâmico (domínio, parâmetros e forçantes) .....</b>	<b>17</b>
3.2.1.1 Calibração do Hidrodinâmico.....	21
<b>3.2.2 Modelo de qualidade de água .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.3 Escalas de tempo .....</b>	<b>25</b>
3.2.3.1 Tempo de renovação.....	26

3.2.3.2 Idade da água e Tempo de residência.....	27
<b>3.2.4 Parametrização da substância.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.5 Definição dos cenários.....</b>	<b>29</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
4.1 CENÁRIO PILOTO: TEMPO DE RENOVAÇÃO – PERÍODO CHUVOSO E SECO... 34	34
4.2 CENÁRIO 1 E 2: IDADE DA ÁGUA CONTINENTAL – PERÍODO CHUVOSO E SECO .....	37
4.3 CENÁRIO 3 E 4:TEMPO DE RESIDÊNCIA – PERÍODO CHUVOSO E SECO.....	41
4.4 CENÁRIO 5 E 6: LANÇAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS – PERÍODO CHUVOSO E SECO .....	45
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>62</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, é recorrente o empenho antrópico em desenvolver materiais que ofereçam benefícios inexistentes em materiais naturais. O marco do desenvolvimento do plástico começou com o uso de materiais que possuíam propriedades plásticas intrínsecas, como a goma-laca e a goma de mascar. O grande avanço veio com a criação da Parkesina (em 1862) e, posteriormente, da baquelite (1907), o primeiro plástico totalmente sintético produzido em massa (Plastics Europe 2021, BPF 2014), substituindo o histórico uso de marfins de elefantes e cascos e chifres de bovinos (Atlas do Plástico 2020, Abiplast 2022).

Os primeiros relatos da poluição por plástico nos oceanos surgiram na década de 1970. No entanto, somente nos últimos anos, esses relatos ganharam destaque da mídia, do público e da comunidade científica, após as primeiras estimativas com base no descarte inadequado de resíduos, sendo alvo de estudo de diversas áreas, desde ciências de polímeros, engenharia ambiental, ecologia, toxicologia, biologia marinha e oceanografia (Law 2017).

Sabe-se que mais de 75% dos itens de lixo plástico marinho são oriundos de fontes terrestres, cujas principais fontes de poluição com base em plástico são: a entrada de água doce; turismo; operações portuárias; e atividades residenciais e domésticas (Andrady 2011). Esta última, contribuindo significativamente para a acumulação de detritos no ambiente costeiro (Thushari *et al.* 2017).

O plástico se difere de outras categorias de detritos orgânicos, por ser considerado um poluente orgânico persistente. Essa característica o torna uma grave ameaça às bacias oceânicas, devido a sua longa vida útil e o potencial de pronto transporte (seja pela água e/ou vento). Conseqüentemente, estima-se que detritos plásticos com contagens de cinco trilhões, pesando um total de 260 mil toneladas, estão flutuando sobre a superfície dos oceanos mundiais, como resultado do descarte inadequado de resíduos (Eriksen *et al.* 2014, Thushari & Senevirathna 2020).

A problemática do plástico se intensificou com o aumento da demanda global por plásticos. A qual cresceu consistentemente nos últimos anos, e passou de uma produção anual estimada de 1,5 milhões de toneladas (*mt*) em 1950, para cerca de 390 *mt* em 2021. Grande parte dessa produção é proveniente do Continente Asiático (52%), sendo que 32% provêm da China; 3% do Japão; e os outros 17% do resto da Ásia (Plastic Europe 2022).

Além disso, é importante destacar que durante a pandemia de Covid-19 a produção global de plásticos diminuiu significativamente, refletindo os impactos econômicos e logísticos causados pelo contexto de crise. Na Europa, após uma diminuição de 2,3 *mt* em 2020, a produção de plásticos voltou a crescer em 2021, passando de 53,9 para 57,2 *mt* (Plastic Europe 2022), reflexo da resiliência do setor produtivo europeu. No Brasil, onde a produção anual de 2022 diminuiu em 0,3 *mt* em relação a 2019, essa resiliência ainda não foi alcançada (Abiplast 2022).

Entre 2010 e 2019, a produção de transformados plásticos no Brasil diminuiu de 8,7 para 7,1 *mt*, enquanto o consumo de plásticos pelos brasileiros permaneceu historicamente superior à produção, variando de 9 a 7,6 *mt* no mesmo período (Abiplast 2019). A partir de 2021, o setor brasileiro experimentou mais uma queda na produção, abandonando o crescimento observado em 2020 (7,3 *mt*) e encerrando o ano de 2022 com uma produção e consumo anual de 6,7 e 7,1 *mt*, respectivamente (Abiplast 2022).

Estima-se que cerca de 4,8 - 12,7 *mt* de plásticos entram anualmente nos oceanos mundiais, a partir de populações costeiras (Jambeck *et al.* 2015). Seja pelo aporte fluvial, marés, praias, ações portuárias e/ou pelo transporte eólico. Todavia, o aporte fluvial pode ser considerado uma das principais rotas de entrada de resíduos plásticos oriundos do continente (Lebreton & Andrady 2019, Lebreton *et al.* 2017, Jambeck *et al.* 2015).

Esforços pretéritos envolvendo modelagem numérica obtiveram fluxos de saída de plástico dos rios para os oceanos na ordem de 1,15 - 2,41 (Lebreton *et al.* 2017) e 0,47 - 2,75 (Schmidt *et al.* 2017) *mt* por ano. Ambos os trabalhos (Lebreton *et al.* 2017 e Schmidt *et al.* 2017) foram modelados com base no conceito de Lixo Plástico Mal Gerenciado (LPMG). Segundo Mai *et al.* (2020), essa metodologia pode gerar desproporções em comparação com medições em campo, visto que geralmente os dados observados são inferiores aos projetados.

Nesse contexto, Mai *et al.* (2020) estimaram os fluxos globais de entrada de plásticos de origem fluvial para os oceanos na faixa de 57 – 265 mil toneladas por ano, aproximadamente um décimo das estimativas baseadas em LPMG. Assim, sugerindo que os modelos globais baseados no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), como principal fonte preditora, são mais coerentes com os dados observacionais.

Estudos recentes vêm contribuindo para o melhor entendimento sobre a diferença da quantidade de resíduos plásticos observados em campo e os modelados. Van Emmerik *et al.*

(2020) relataram a ocorrência de zonas de acúmulo de macroplásticos na foz dos três principais rios que atravessam a região metropolitana de Manila, em Filipinas, durante os períodos de baixa descarga fluvial. Sugerindo que os plásticos são temporariamente retidos nos estuários, podendo, porém, ser exportados durante as marés de quadratura e/ou durante o aumento da vazão do rio.

No âmbito da Zona Costeira Amazônica (ZCA), ao estudar a poluição em áreas vegetadas e não vegetadas de estuários urbanos (de forma qualitativa e quantitativa), Gonçalves *et al.* (2020) verificaram que o plástico foi o principal material encontrado (80,97%). A maior parte dos resíduos plásticos foram identificados em áreas vegetadas (73,11%). Assim, indicando que os habitats vegetados do estuário do rio Pará são pontos críticos de acúmulo de lixo flutuante, podendo funcionar como sumidouros da poluição por plásticos.

## 1.1 MODELAGEM EM ESTUÁRIO AMAZÔNICO

Diversos modelos numéricos têm sido empregados para analisar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em estuários, com abordagens tanto em 2D quanto em 3D (Borba 2014, García *et al.* 2010, Gleizon *et al.* 2003, Wu *et al.* 1999, Xie *et al.* 2010). No entanto, na região amazônica, embora tenham sido desenvolvidos modelos numéricos para estudar aspectos como a intrusão salina e o escoamento líquido, nenhum deles até o momento abordou especificamente o transporte de plásticos.

Dentre os estudos realizados, Böck *et al.* (2011) utilizaram um modelo hidrodinâmico baseado em malha irregular da Baía do Guajará para investigar as variações da morfologia do fundo e seu impacto na circulação local. Os resultados destacaram a forte influência das marés e da vazão dos rios, como Acará, Moju e Guamá, na hidrodinâmica local, tanto em períodos de sizígia quanto de quadratura, ressaltando que alterações na batimetria acarretam mudanças significativas no padrão de circulação.

Borba & Rollnic (2016), por outro lado, objetivam quantificar o escoamento líquido nos rios Amazonas e Pará durante as estações chuvosa e seca, utilizando um modelo numérico 2D. Os resultados revelaram que o estuário do Rio Pará apresenta uma magnitude semelhante ao Rio Amazonas, destacando-se como um importante canal de transporte de matéria do continente para o oceano, evidenciando a complexidade e a relevância dos processos hidrodinâmicos na região amazônica.

Em outro estudo, Rosário *et al.* (2016) identificaram, por meio de modelagem numérica 2D, uma intrusão salina longitudinal no estuário do rio Pará, cuja extensão varia conforme a descarga fluvial e as marés. Esta intrusão pode atingir até 130 km em períodos de baixa vazão e 70 km em períodos de alta vazão, resultado das interações entre as forças de maré e a descarga fluvial das bacias que drenam o estuário.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Nesse sentido, é imprescindível o conhecimento dos riscos e rotas de contaminação, assim como, a quantificação espaço-temporal das emissões decorrentes da poluição por plásticos. Dessa forma, potencializando o gerenciamento costeiro de baixo custo e possibilitando medidas de mitigação mais eficazes (Law *et al.* 2017, Lebreton *et al.* 2017). Como solução, torna-se fundamental a implementação de um modelo de simulação, para auxiliar na compreensão das principais zonas de retenção e transporte do macroplástico ( $\geq 5\text{mm}$ ) fluvial/marinho. Além de corroborar na identificação de locais críticos ao descarte inadequado de detritos plásticos, sobretudo, próximo a regiões metropolitanas.

No presente estudo, foi desenvolvida a primeira simulação matemática para o transporte de plástico, em um estuário urbano dominado por maré, na costa amazônica (adjacente ao centro urbano de Belém). Além de contar com a utilização de dados observacionais para a calibração do modelo hidrodinâmico e para parametrizar o aporte de resíduos plásticos. Tornando-se um trabalho pioneiro para o litoral amazônico, e contribuindo significativamente para a expansão da fronteira do conhecimento sobre a temática, tanto no âmbito nacional, quanto regional.

Essa dissertação pressupõe a existência de dois processos distintos ao longo da bacia de drenagem da Baía do Guajará, sendo eles: 1) zonas que funcionam como sumidouros da poluição por plástico; e 2) zonas de exportação desses plásticos para fora do ambiente estuarino modelado. Ambas associadas à elevada descarga fluvial, à dinâmica e assimetria de maré, e ao próprio contraste entre as áreas urbanizadas e não urbanizadas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do estudo é implementar o primeiro modelo matemático de simulação para analisar como ocorre o transporte de resíduos plásticos em rios urbanos dominados por maré, na costa amazônica.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar um modelo matemático para simular o transporte de macroplásticos (=5mm) flutuantes na Baía do Guajará;
- Estimar o tempo de renovação e tempo de residência dos resíduos ao longo da bacia de drenagem da Baía do Guajará, para o período seco e chuvoso;
- Verificar se o período sazonal influencia na dinâmica de transporte dos resíduos plásticos (exportação e importação);
- Evidenciar se existem zonas de retenção de plástico (sumidouros) ao longo da bacia de drenagem da Baía do Guajará.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região interna da Zona Costeira Amazônica (ZCA), na costa estuarina paraense, próximo a cidade de Belém (Pará-Brasil), abrangendo diversos rios importantes da região, com destaque ao rio Guamá e Baía do Guajará. A localização e a posição geográfica da área podem ser observadas na Figura 1.

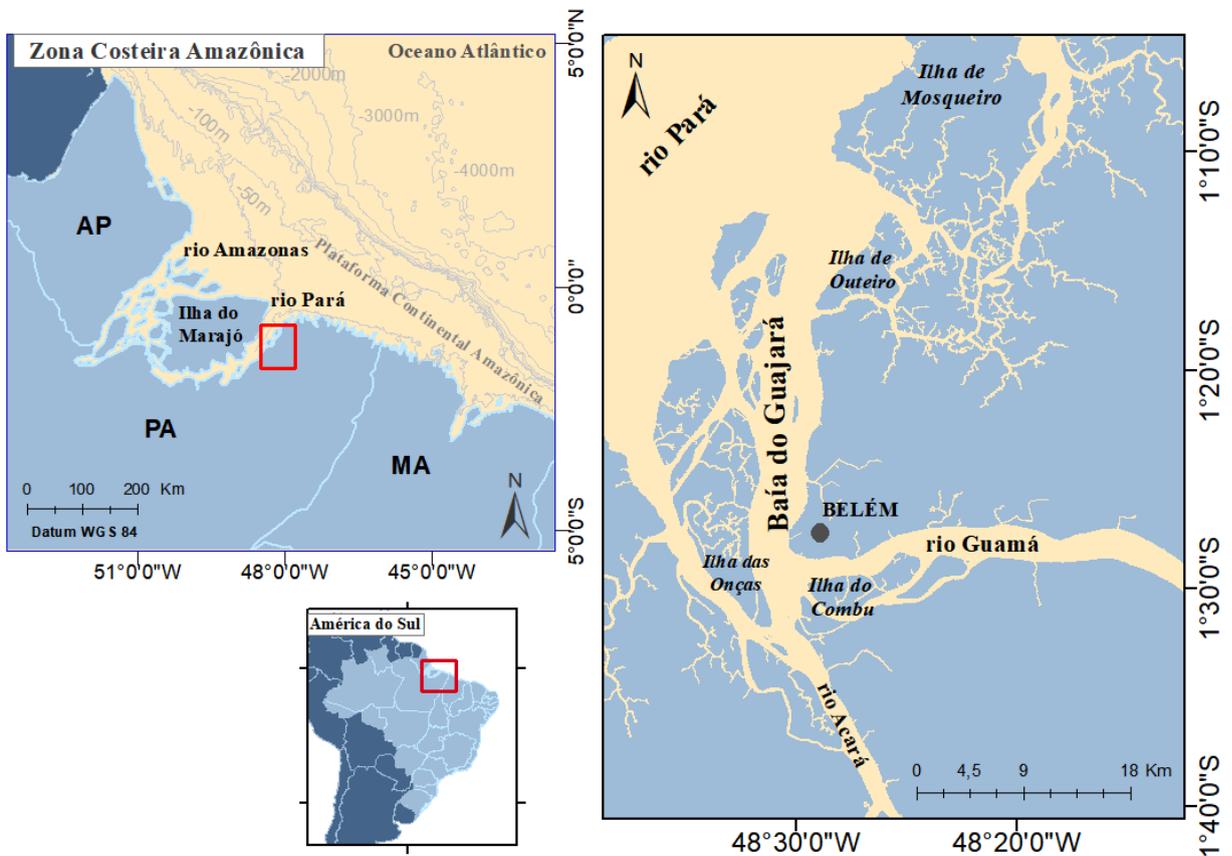


Figura 1: Localização da área de estudo. Fonte: O autor

A Zona Costeira Paraense (ZCP), parte da ZCA, abrange um território com diversas realidades geográficas. Este espaço, significativo para aproximadamente 47% da população do estado, requer um olhar diferenciado no planejamento, ordenamento e gestão desse território. Após a promulgação da Lei Estadual Nº 9.604/2020, que instituiu a Política Estadual de Gerenciamento Costeiro – PEGC/PA, a ZCP passou a ser dividida em cinco setores: Marajó Ocidental, Marajó Oriental, Continental Estuarino (onde este trabalho se insere), Flúvio-marítimo e Costa Atlântica Paraense (Semas 2020), conforme a Figura 2.

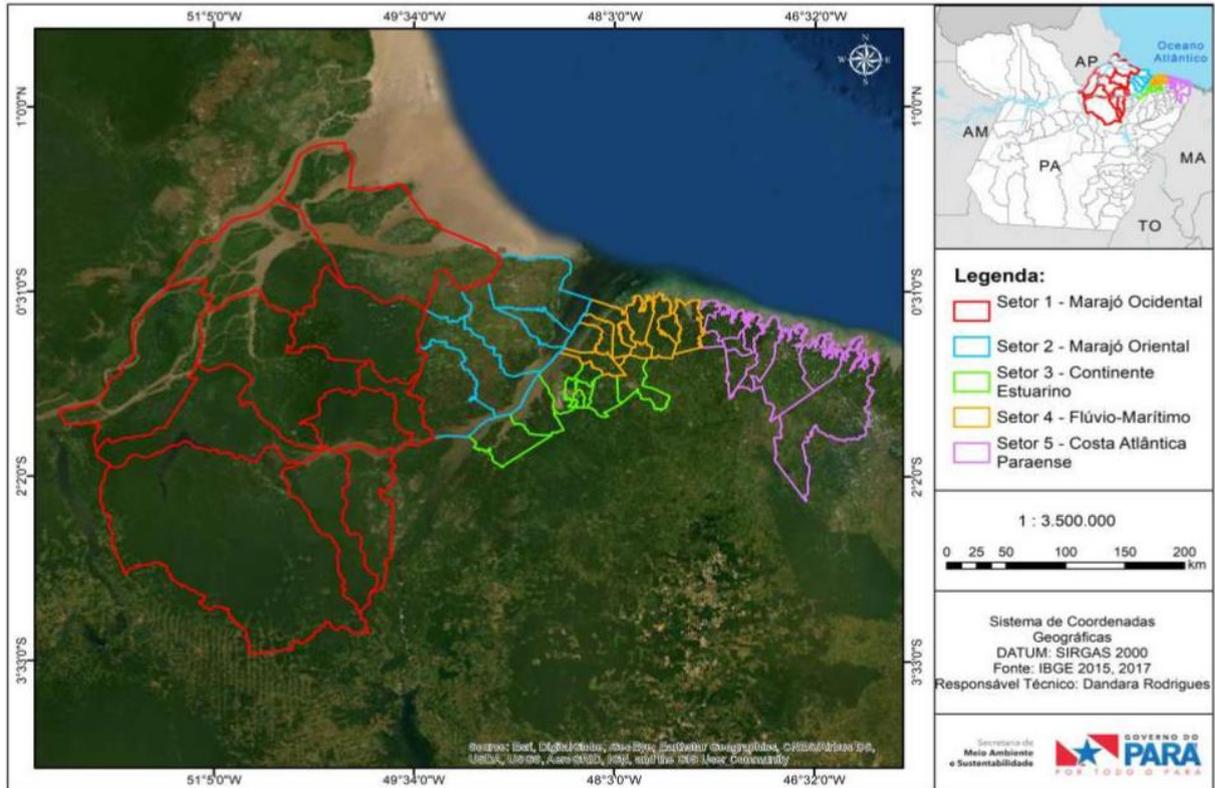


Figura 2: Zona Costeira Paraense segmentada em 5 setores: 1) Marajó Ocidental; 2) Marajó Oriental; 3) Continental Estuarino; 4) Flúvio-Marítimo; 5) Costa Atlântica Paraense. Fonte: Semas 2020.

O clima da região é influenciado pela distribuição anual das chuvas, devido à migração latitudinal da posição da Zona de Convergência Intertropical – Zcit (Cavalcanti *et al.* 2009). A variação sazonal de precipitação compreende dois períodos bem definidos, o período seco (julho a novembro) e o período chuvoso (janeiro a maio), com precipitação média variando de 2.500 a 3.000 mm anuais e temperatura média em torno de 26°C (Moraes *et al.* 2005, Semas 2020).

Os dois principais sistemas que drenam a ZCA e a ZCP são o rio Amazonas (RA) e o rio Pará (RP), respectivamente. O RA possui uma área de aproximadamente  $7 \times 10^6 \text{ km}^2$ , sendo considerada a maior bacia hidrográfica do mundo (Nittrouer & Demaster 1986). Possui uma descarga de cerca de  $1,8 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (ou 0,18 Sv, onde  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , unidade de medida utilizada para representar o transporte de volume de correntes oceânicas) de água doce que flui para o oceano Atlântico (Oltman 1968). Essa medida representa cerca de 16 a 20% de toda água doce que deságua nos oceanos anualmente (Molinier *et al.* 1996). A vazão máxima ocorre nos meses de maio a junho (aproximadamente  $2,2 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e a mínima entre os meses de outubro a novembro ( $1 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) (Richey *et al.* 1986).

O RP, principal corpo hídrico inserido no modelo, possui uma descarga líquida de aproximadamente  $0,2 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Figura 3), equivalente a apenas uma ordem de grandeza inferior ao RA (Prestes 2020). O RP, cujo principal afluente é o rio Tocantins, não possui uma nascente propriamente dita, e inicia-se na baía das bocas e segue bordejando o sul e o leste da ilha do Marajó, com uma largura de 60 km na sua foz, sendo dominado por maré ao longo dos 350 km de extensão longitudinal (Prestes *et al.* 2017, Rosário 2016). Prestes *et al.* (2020) verificaram que a vazão do RP atinge máximos de  $3,8 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  em abril e mínimos de  $9 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  em outubro, considerado o rio com a quinta maior descarga líquida anual do mundo.

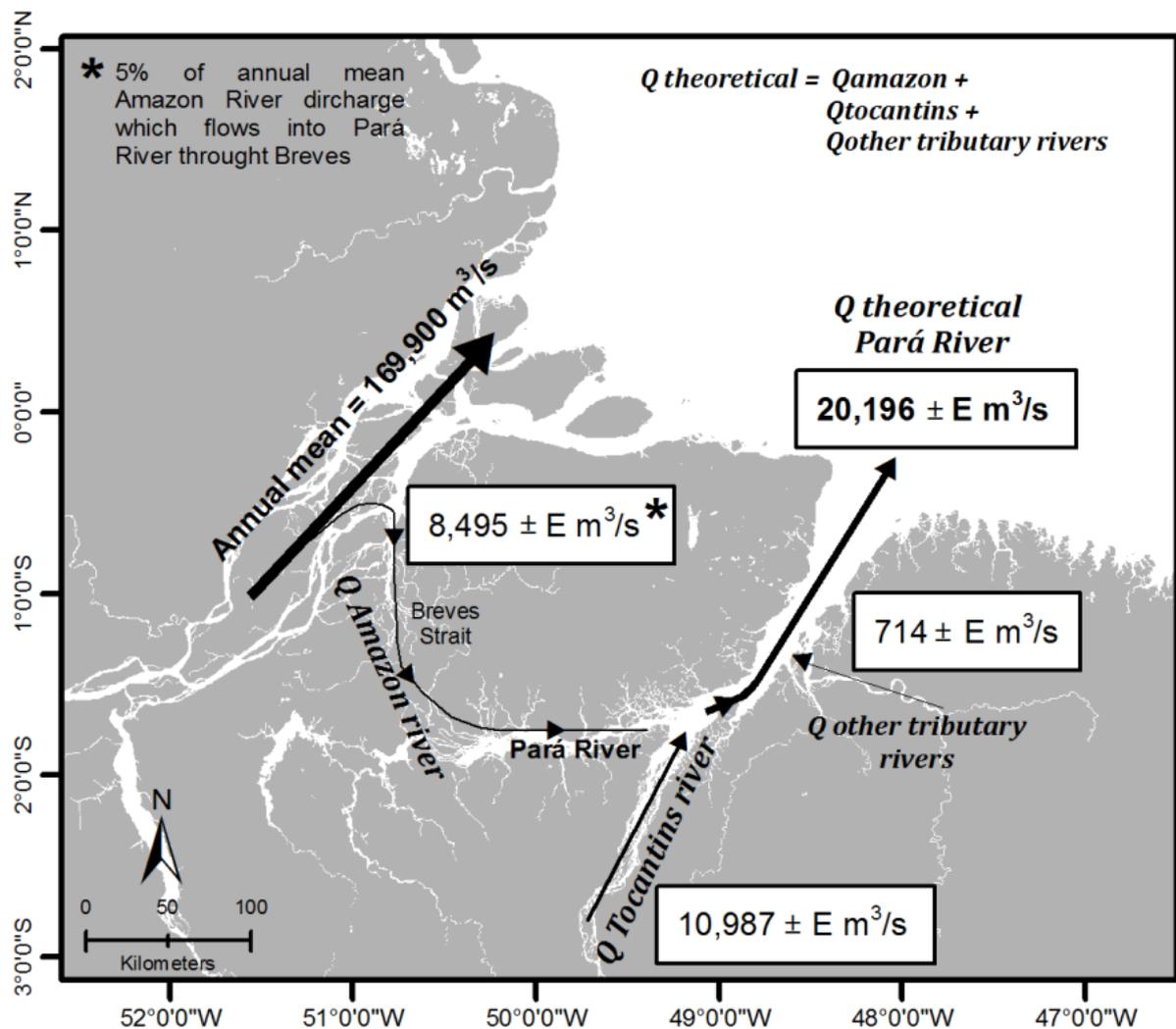


Figura 3: Modelo de caixa que representa a vazão do estuário do RP e seus principais contribuintes. Fonte: Prestes *et al.* (2020).

A Baía do Guajará, inserida na margem direita do rio Pará (RP), é a principal ligação entre o estuário do RP e a sub-bacia Guamá-Moju (Figura 4), abrangendo uma área de aproximadamente 87.400 km<sup>2</sup>, sendo alimentada pelos rios Guamá, Moju, Acará e Capim (Gregório & Mendes 2009). Forma-se na confluência dos rios Acará e Guamá, ao sudoeste de Belém, estendendo-se até próximo da ilha de Mosqueiro, onde se encontra com o estuário do RP, também conhecido como Baía do Marajó. A margem esquerda da baía é caracterizada por numerosas ilhas e canais, destacando-se a ilha das Onças, seguida por um conjunto de ilhas menores.

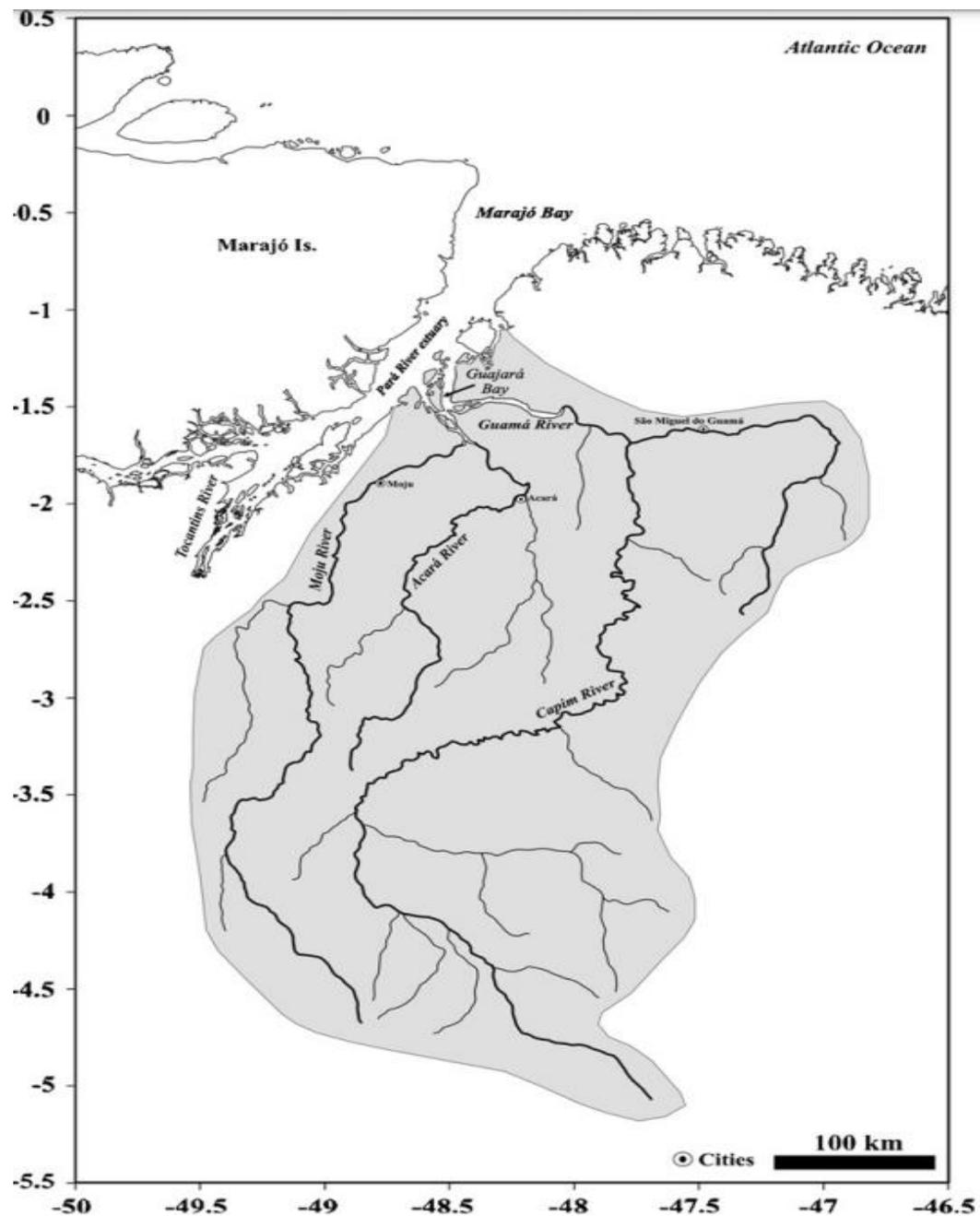


Figura 4: Sub-bacia Guamá-Moju e suas principais drenagens. Fonte: Gregório & Mendes (2009).

Miranda (2002) define as correntes de marés com assimetria positiva como sendo aquelas em que as correntes de enchente são mais intensas (menor tempo de duração) do que as de vazante, resultando em maior energia e capacidade de transporte. Na Baía do Guajará, durante a sizígia, os valores médios de correntes superficiais são de aproximadamente 1,89 m/s e 1,78 m/s para enchente e vazante, no período chuvoso, e 1,74 e 1,59 m/s para enchente e vazante, no período seco (Bock 2010). Além disso, observa-se que as correntes de enchente (com menor tempo de duração) têm uma preferência de fluxo pela margem direita da Baía do Guajará e rio Guamá, enquanto as correntes de vazante têm preferência de escoamento pela margem esquerda (Gregório 2008, Bock 2010), conforme a Figura 5.

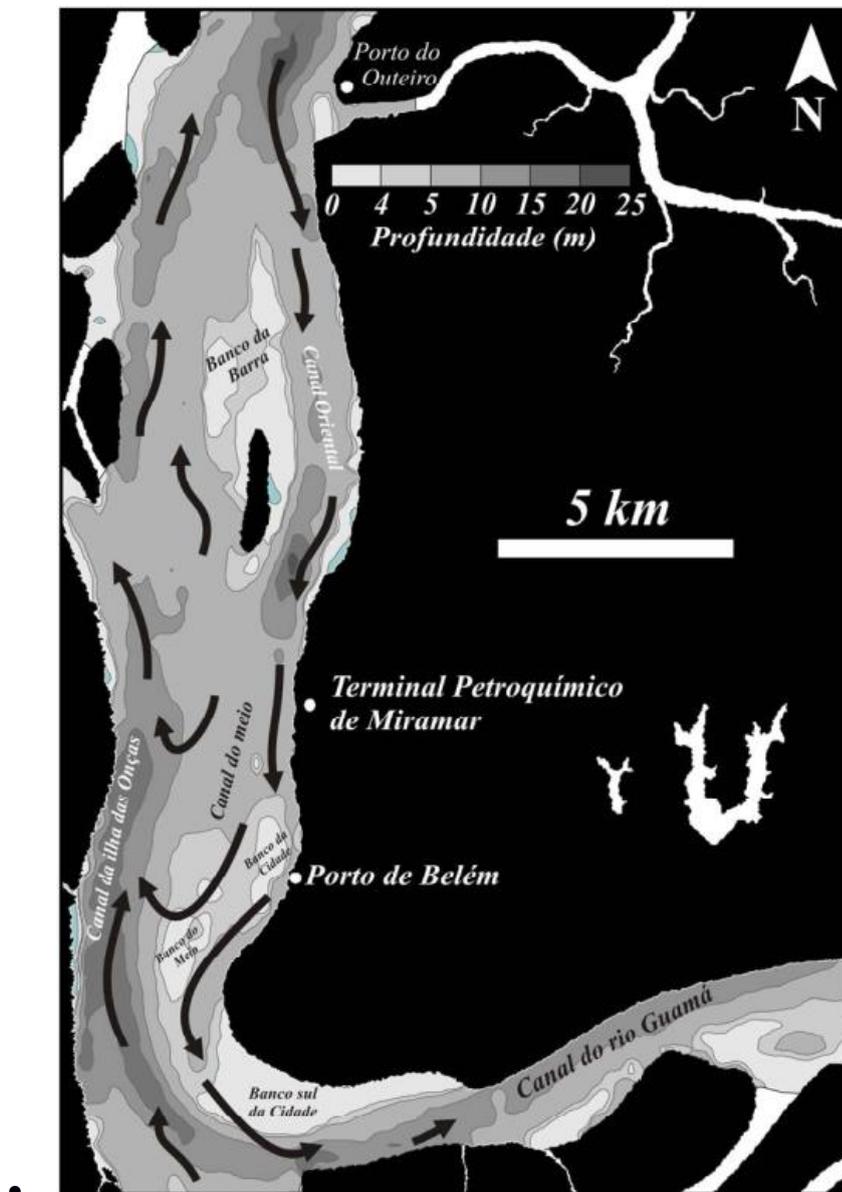


Figura 5: A Figura mostra os depósitos de sedimentos lamosos e a distribuição das marés de enchente, que adentram preferencialmente pela margem direita da Baía do Guajará, onde se encontram com a corrente de final de vazante do canal da ilha das Onças, na margem esquerda da Baía. Fonte: Gregório (2008).

A maré no estuário do Rio Pará avança por vários quilômetros continente adentro, formando uma extensa zona de transição fluviomarinha sob um regime de marés semidiurnas (Gregório & Mendes 2009). Localizada a cerca de 120 km da foz do RP, a Baía do Guajará apresenta um ambiente dinâmico e energeticamente misto, com uma interação significativa entre as correntes de mesomarés, correntes fluviais e o regime de ondas (dentre estes, o de menor relevância). As curvas assimétricas da variação de maré e velocidade de corrente na região podem ser observadas nas Figuras 6 e 7.

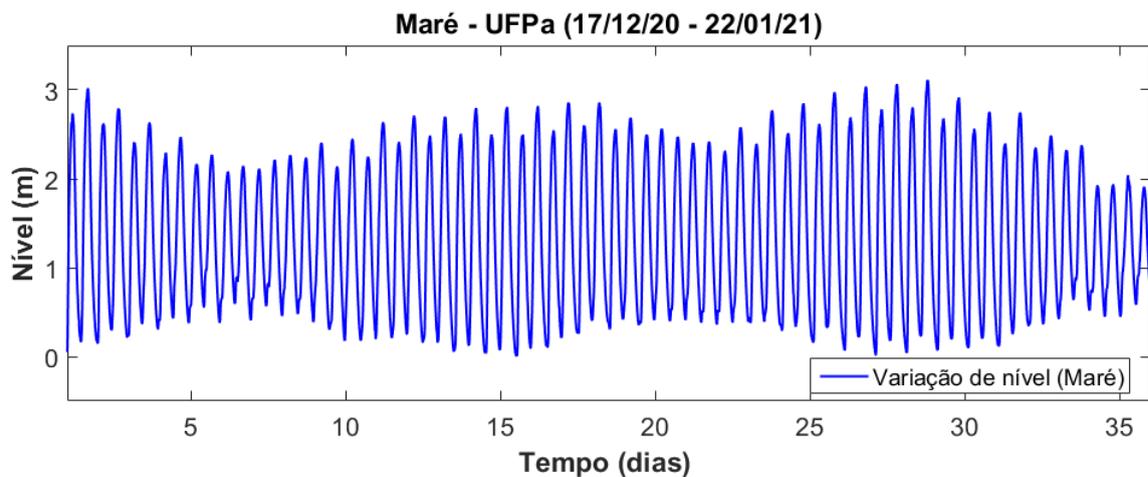


Figura 6: Variação do nível d'água ao longo de 36 dias de fundeio no trapiche da UFPa (foz do rio Guamá), a menos de 7km da Baía do Guajará, sob uma frequência amostral de 1 dado a cada 10 minutos. Fonte: O autor, com base no banco de dados do Lapmar.

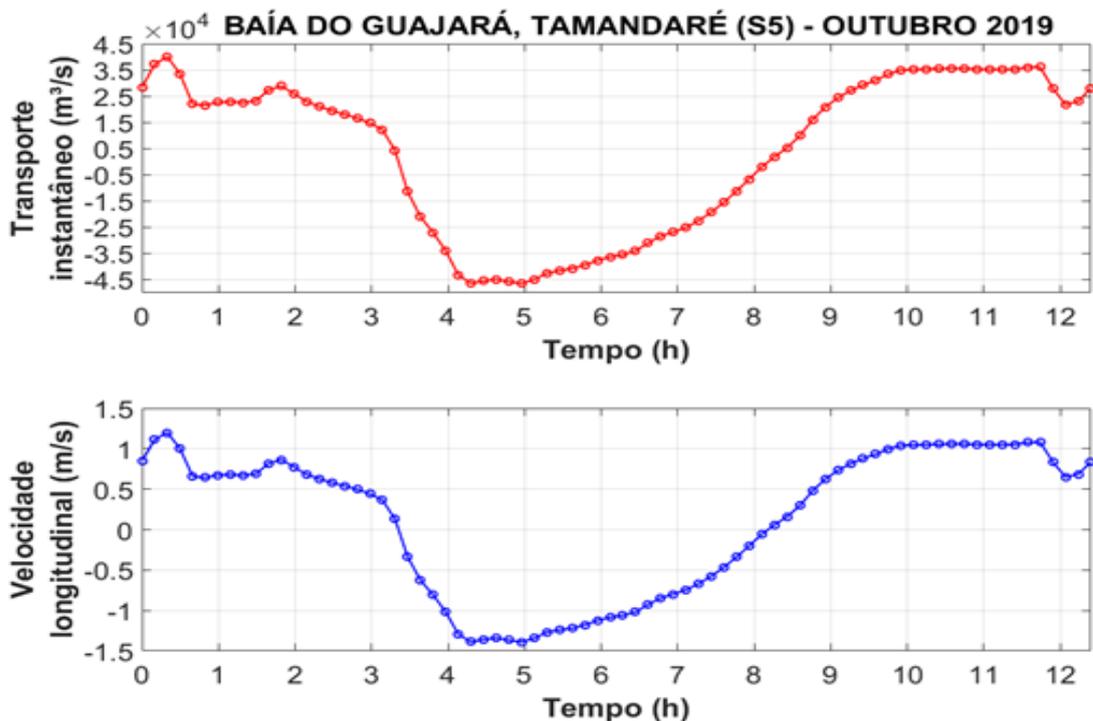


Figura 7: Valores médios de Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e Corrente ( $\text{m}/\text{s}$ ) ao longo de 12h referente ao transecto realizado na Baía do Guajará, no período seco, para a calibração do modelo hidrodinâmico. Fonte: O autor, com base no acervo do Lapmar.

Por fim, a Bacia Hidrográfica do Tamararé (BHT), de grande relevância neste estudo, é uma das 14 bacias (Reduto, Una, Estrada Nova, Tucunduba, Aurá, Murutucum, Val-de-Cães, Mata fome, Ariri, Cajé, Paracuri, Anani e Outeiro) que compõem a porção continental do município de Belém (Belém 2014, Nylander 2019), abrangendo uma área de contribuição efetiva igual a 1,75 km<sup>2</sup> (Souza 2019, Silva *et al.* 2020). Situada no sudoeste da cidade, engloba partes dos bairros Batista Campos, Cidade Velha, Campina e Jurunas, como ilustrado na Figura 8.

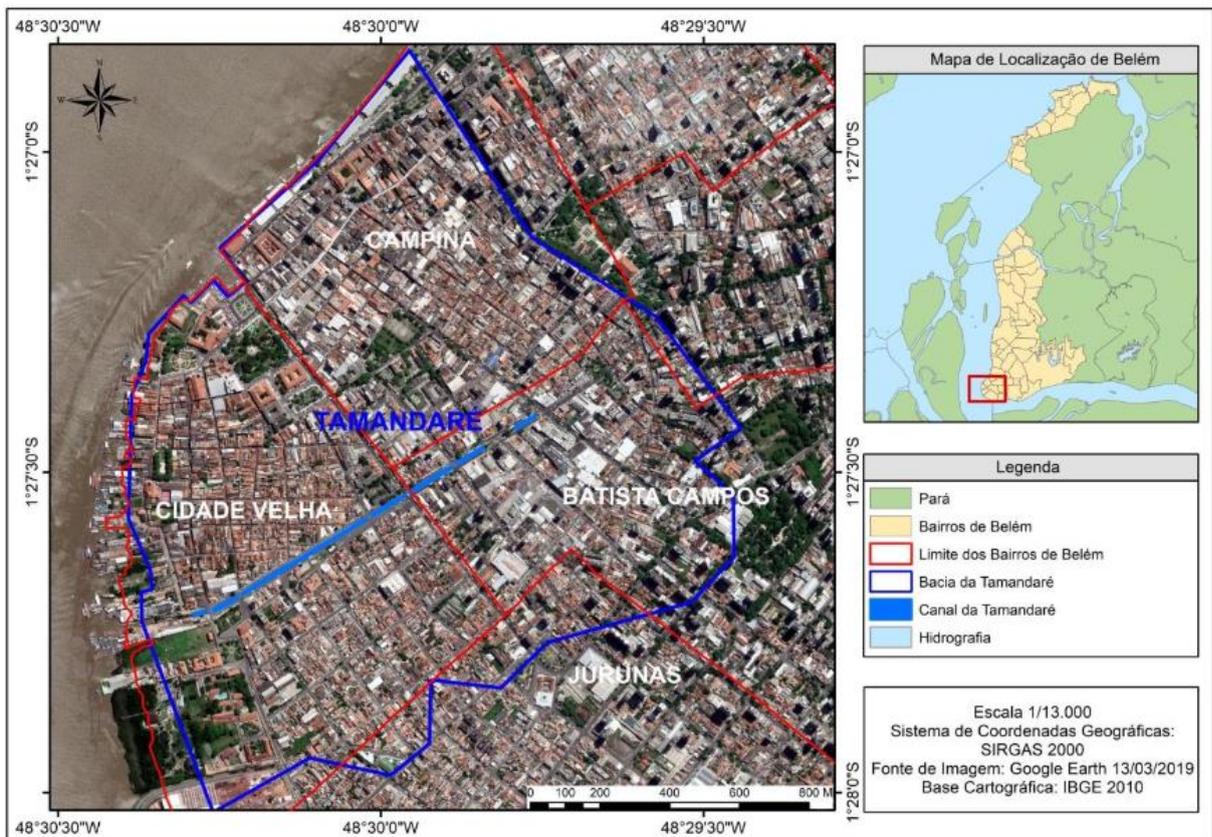


Figura 8: Localização da Bacia Hidrográfica da Tamandaré. Fonte: Nylander (2019).

### 3.1.1 Aspectos Socioeconômicos

Belém, capital do Estado do Pará, é o município mais populoso do Estado com 1.303.403 hab. em uma área de 1.059,46 km<sup>2</sup>, possui uma densidade demográfica de 1.230,25 hab/km<sup>2</sup>. O município é um dos 144 que compõem o estado do Pará, dos quais 8 fazem parte da região metropolitana de Belém: Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara, Santa Isabel do Pará, Castanhal, Belém e Barcarena (recém incluído pela lei 164, de 5 de abril de 2023). Situada às margens do rio Guamá ao sul e da Baía do Guajará a oeste, a cidade de Belém apresenta uma rica diversidade cultural e histórica. Além disso, possui um Índice de

Desenvolvimento Humano Municipal (Idhm) de 0,746, abrangendo uma área urbanizada de 147,35 km<sup>2</sup> (Ibge 2022).

Belém possui 47,81% de sua área ocupada por zonas urbanas, onde 4,1% dos domicílios estão em áreas de risco iminente de inundação e deslizamentos (Snis 2021), com grande parte do município situada abaixo de 4 metros de altitude (Belém 2014). A coleta de resíduos domiciliares alcança 96% da população, resultando em uma média de 0,69 kg de resíduos por habitante ao dia. No entanto, apenas 17,12% da população belenense tem acesso a serviços adequados de esgotamento sanitário, frente a média de 15,96% do Estado e 66,95% do Brasil (Snis 2021).

Existem 11 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) descentralizadas em Belém, localizadas nas áreas de Porto, Vila da Barca, Rua da Mata, Tavares Bastos, Una (antiga EPC Bacia do Una), Bengui, Pratinha I, Aeroporto, Coqueiro, Sideral e Fé em Deus (ANA 2020). No entanto, a grande maioria dessas estações está atualmente inoperante ou em obras (Belém 2020). De acordo com o último levantamento do Governo Federal no Atlas Esgotos, publicado em 2017, apenas 41,75% do esgoto em Belém recebe tratamento adequado, 9,77% é coletado, mas não tratado, e 48,48% não é coletado nem tratado (ANA 2017). Isso resulta em danos aos organismos devido ao despejo inadequado de resíduos sólidos e líquidos no ambiente (Idesp 1990), o que agrava a degradação ambiental dos corpos hídricos da Baía do Guajará e da Foz do rio Guamá.

Estudos recentes continuam apontando problemas recorrentes no saneamento básico em Belém. Souza *et al.* (2022) identificaram deficiências na coleta de resíduos e a falta de educação ambiental no bairro no Guamá. Dutra *et al.* (2018) observaram condições sanitárias precárias no canal da Tamandaré, no bairro da Cidade Velha, com 77% dos moradores associando o lixo nas ruas aos alagamentos. Baía *et al.* (2021), no bairro do Marco, destacaram a relação direta entre saúde e saneamento, evidenciando que a ausência de infraestrutura básica, como coleta de lixo e água tratada, agrava os problemas de saúde e alagamentos.

Historicamente, após ter crescido ao longo dos contornos dos rios (fase ribeirinha – vivenciada até meados do século XVIII), Belém passou por uma fase de continentalização, a partir da segunda metade do século XIX, marcada pela diminuição da influência fluvial na urbanização da cidade (Abelém 2018), conforme a Figura 9. No entanto, o impacto histórico do crescimento urbano desordenado, devido à proximidade dos rios, resultou em uma significativa parcela da população vivendo em condições precárias, o que reflete o histórico Idhm < 0,69 até

meados de 2000, englobando as categorias de muito baixo, baixo e médio. Ademais, durante as marés equinociais, as altas precipitações e marés semidiurnas intensificam os alagamentos, aumentando a poluição por descarte inadequado de resíduos nos esgotos, rios e, conseqüentemente, nos oceanos.

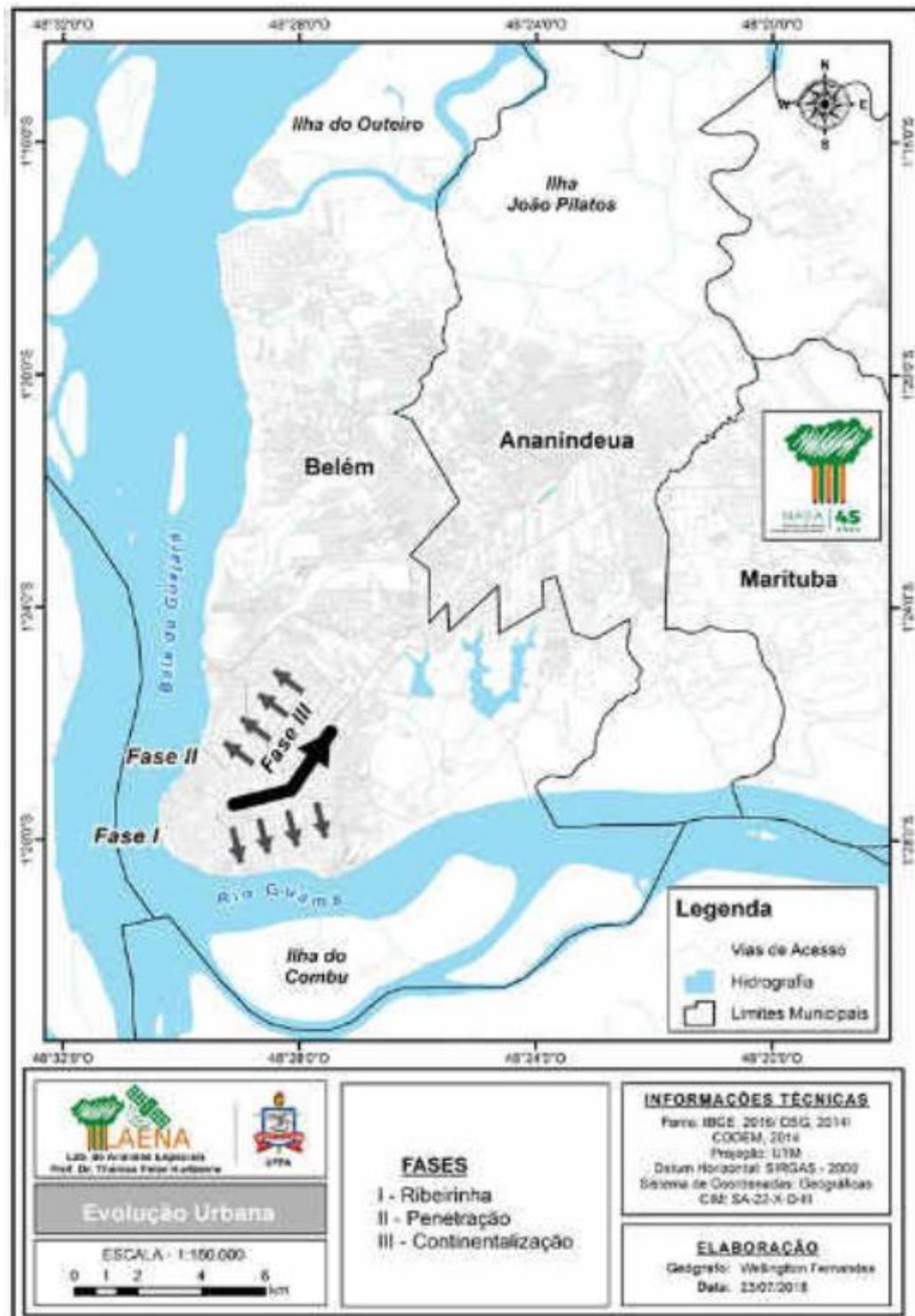


Figura 9: Mapa de Belém e suas respectivas fases de urbanização: 1) fase ribeirinha - desde a fundação de Belém até meados do século XVIII; 2) fase de penetração - início do século XIX; e 3) fase de continentalização - a partir da metade do século XIX. Fonte: Abelém (2018).

Nesse contexto, a Bacia hidrográfica da Tamandaré é reconhecida como o ponto de partida para a urbanização de Belém, tendo desempenhado um papel crucial no crescimento desordenado da cidade, devido à sua morfologia. Como destacado por Brito (2007), áreas mais elevadas foram priorizadas para a habitação, enquanto as partes mais baixas, como o Alagado do Piri, permaneceram inundadas, separando os principais bairros da época (século XVII), como Cidade e Campina, conforme ilustrado na Figura 10. Esse padrão evidencia a influência histórica do rio Tamandaré na estrutura urbana de Belém, contribuindo para os atuais problemas de inundação e descarte de resíduos urbanos na Baía do Guajará.



Figura 10: Reconstituição dos bairros Cidade e Campina, separados pelo Alagado do Piri, na formação histórica da malha urbana de Belém – século XVII. Fonte: Penteadó (1968) *apud* Brito (2007).

Indústrias e núcleos habitacionais são alguns dos vetores que despejam frequentemente grandes volumes de resíduos sólidos e líquidos diretamente nas águas da baía (Saraiva 2007). Embora estuários com alta hidrodinâmica possuam uma capacidade de autodepuração, essa capacidade pode não ser suficiente para evitar a contaminação recorrente. Ademais, pequenos portos sem controle ambiental e embarcações antigas e encalhadas são outras fontes poluidoras.

Além de sua importância ecológica e das regiões de alta sensibilidade ambiental, Belém é marcada por atividades econômicas e sociais significativas. Na região metropolitana de Belém, há uma concentração expressiva de indústrias e comunidades residenciais. Os habitantes locais utilizam as várzeas e rios para sustento alimentar e econômico (Gonçalves & Souza Filho 2005) e como meios de locomoção para atividades recreativas e esportivas (Gregório *et al.* 2006).

No contexto histórico-cultural, as margens da Baía do Guajará abrigam os principais patrimônios de Belém, como o Mercado Ver-o-Peso, a Estação das Docas e o Forte do Castelo do Senhor Santo Cristo (ou simplesmente Forte do Castelo). Nessa região, há um intenso movimento de embarcações de diversos tamanhos e a comercialização de combustíveis em postos flutuantes (Gregório *et al.* 2006).

As atividades portuárias incluem o Porto Organizado de Belém, que é composto pelo Porto de Belém, o Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (Miramar) e o Terminal Portuário do Outeiro, todos operados pela Companhia Docas do Pará (CDP). A CDP é responsável pela movimentação de aproximadamente 40,6 milhões de toneladas de carga anualmente, abrangendo uma variedade de produtos, como milho, soja, alumina, bauxita, fertilizantes, adubos, soda cáustica, óleo diesel, óleo combustível, manganês e hidróxido de alumínio (CDP 2023).

Em 2010, o Porto de Belém movimentou mais de 1 milhão de toneladas de cargas por ano, com destaque para cargas como madeira, pimenta, palmito, peixe, camarão, castanha-do-Pará e trigo (CDP 2010). Atualmente, sua movimentação anual é de 151.589 toneladas, concentrando-se principalmente em trigo e madeira. Os Terminais de Miramar e Outeiro (o qual aumentou 173% em relação a 2021), movimentaram aproximadamente 2,1 *mt* e 1,4 *mt*, respectivamente, com Miramar focando em óleo diesel e gasolina, e Outeiro em soja e trigo (CDP 2023).

De acordo com as informações supracitadas, é imprescindível desenvolver um modelo de simulação de transporte de plástico para a região amazônica, especialmente nas áreas adjacentes à região metropolitana de Belém, devido à importância turística, social e econômica da região. Para mais, a lacuna científica que existe sobre esse tema em estuários amazônicos dominados por maré precisa ser preenchida.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A modelagem hidrodinâmica computacional estuda o fluxo de fluidos em ambientes naturais como rios, lagos e estuários, utilizando dados de campo processados para simular diferentes condições de escoamento (OCA 2024). Essa abordagem, que emprega equações matemáticas e algoritmos específicos, é crucial para a gestão ambiental, e serve como base para prever diversos processos, incluindo o controle de enchentes e a preservação da qualidade da água.

O modelo hidrodinâmico e o modelo de qualidade de água, utilizados neste trabalho, foram desenvolvidos no *software* Delft-3D, uma plataforma de modelagem computacional multidisciplinar da empresa holandesa Deltares. O programa tem a capacidade de simular numericamente uma variedade de fenômenos em ambientes costeiros, rios, lagos e áreas estuarinas (Deltares 2024a).

A plataforma é composta por diversos módulos agrupados em uma interface principal, abrangendo áreas como vazão, qualidade da água, ondas, morfologia, transporte de sedimentos e pré e pós-processamento. Esses módulos são interconectados dinamicamente, permitindo a troca de dados e resultados entre si.

#### 3.2.1 Hidrodinâmico (domínio, parâmetros e forçantes)

A metodologia adotada para o desenvolvimento do modelo de transporte de plástico baseou-se no modelo hidrodinâmico construído e validado pelo grupo de modelagem numérica de simulação ambiental do Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho - Lapmar, no âmbito da iniciativa Observatório da Costa Amazônica - OCA.

O modelo abrange uma área extensa, como evidenciado na Figura 11, com uma malha de resolução variável criada no módulo D-Flow, cujos detalhes são mostrados na Figura 12a. Para a resolução das equações de águas rasas, foi aplicado o método de Gauss, empregando uma abordagem de volumes finitos.

Devido à diversidade de escalas na região amazônica, o modelo possui resolução de 500, 100, 20 e 4m (Figura 12b), abrangendo desde canais com km de largura a furos e canais com largura de alguns metros. O modelo foi calibrado garantindo a consistência e validade dos resultados obtidos. A digitalização do contorno do domínio foi realizada com base na linha de

preamar, sendo desconsiderado as planícies de inundação, a fim de minimizar os erros devido ao uso de modelos digitais de superfícies e diminuir o custo computacional.

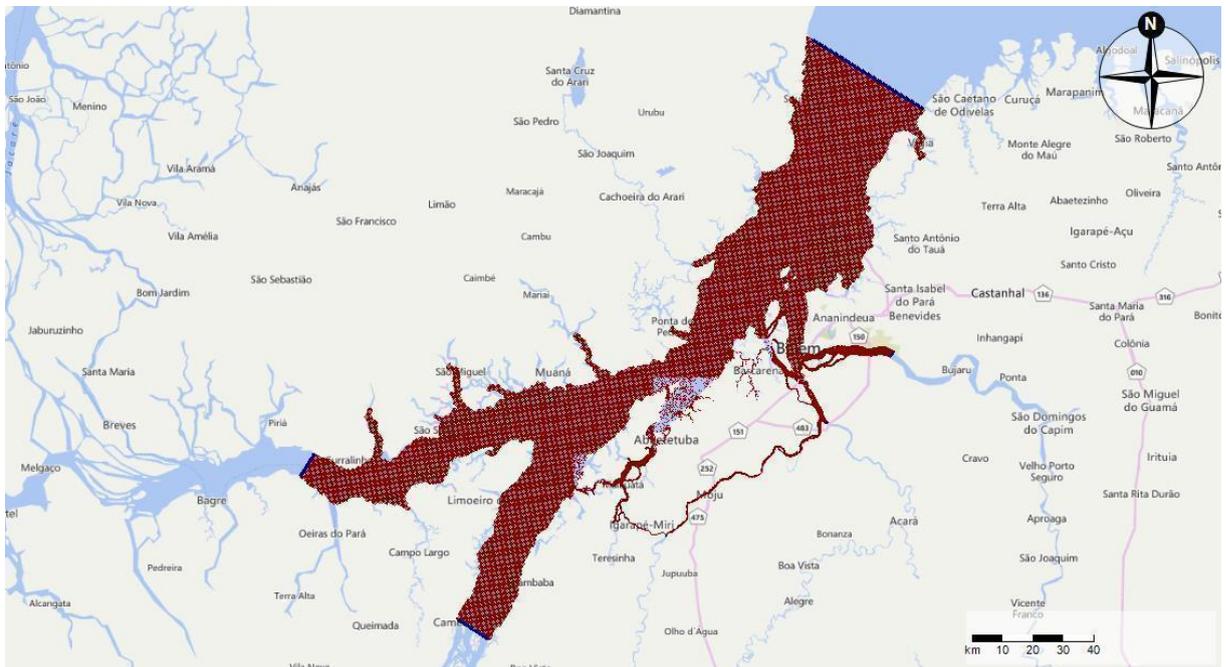


Figura 11: Domínio do modelo hidrodinâmico que abrange toda a extensão do estuário do rio Pará. Fonte: O autor.

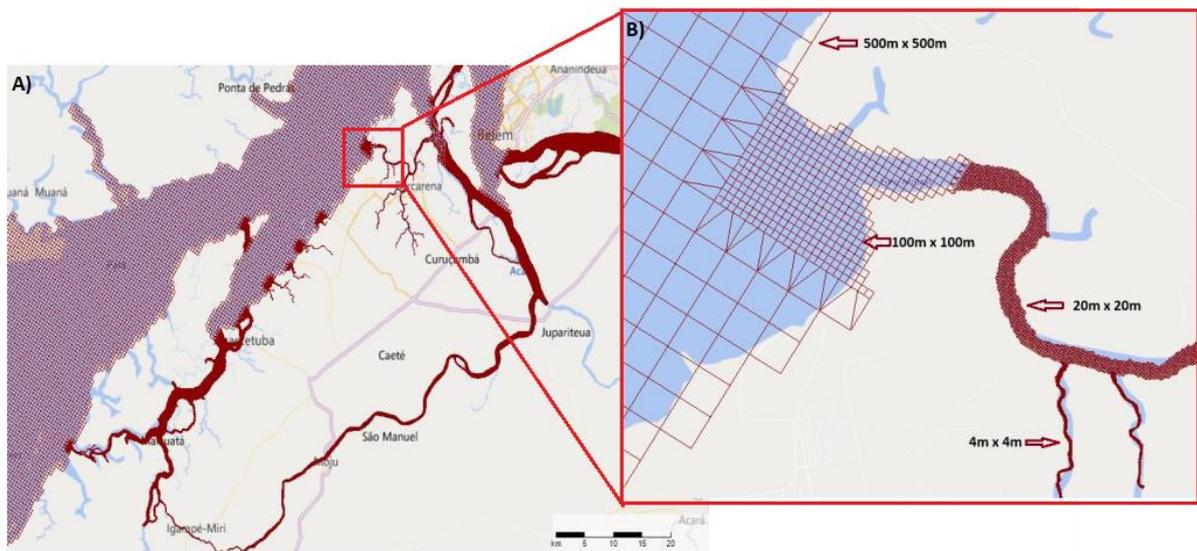


Figura 12: a) Discretização dos canais e rios ao redor da ilha onde encontra-se a cidade de Barcarena; b) Decomposição da malha, evidenciando as resoluções de 500, 100, 20 e 4m. Fonte: O autor.

A rugosidade, referente a resistência de escoamento da massa d'água, foi determinada e refinada durante o processo de calibração, levando em consideração diversos fatores como o material do leito do canal, a presença de vegetação e a irregularidade da superfície. A rugosidade foi estimada com base na metodologia de Arcement Jr & Schneider (1989), cujos

autores adotaram o coeficiente de Manning ( $n$ ) como parâmetro para ajustar os valores de rugosidade conforme as características de cada porção do modelo, dada a equação proposta por Cowan (1956):

$$n = (nb + n1 + n2 + n3 + n4) * m. \quad (1)$$

Onde ( $nb$ ) é o material de fundo; ( $n1$ ) irregularidades da superfície; ( $n2$ ) o grau de irregularidade; ( $n3$ ) a obstrução ao fluxo; ( $n4$ ) a presença de vegetação e ( $m$ ) o fator de correção para meandros do canal, ajustando-se à complexidade da morfologia do sistema, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Valores resultantes de  $n$  para canais e corpos d'água do modelo com domínio de resolução variável, em malha irregular não estruturada. Fonte: O autor, com base nos dados de Lapmar (2023).

<i>Ambiente</i>	<i>Coefficiente de Manning</i>
<i>rio Pará</i>	0,050
<i>rio Tocantins</i>	0,052
<i>Porção sul do Estuário do rio Pará</i>	0,031
<i>Áreas com ocorrência de areia grossa, cascalho e afloramento no Estuário do rio Pará</i>	0,036
<i>Áreas com ocorrência de areia no Estuário do rio Pará e corpos d'água adjacentes</i>	0,031
<i>Áreas com ocorrência de areia fina, silte e argila no Estuário do rio Pará e corpos d'água adjacentes</i>	0,029

A morfologia do terreno (Figura 13) foi composta por três fontes distintas, incluindo dados batimétricos e topográficos. Inicialmente, o levantamento batimétrico *in-situ* foi obtido pelo Lapmar no âmbito do Programa de Macrodrenagem da Bacia da Estrada Nova (Promaben) e dados pretéritos pertencentes ao banco de dados do Lapmar, assegurando informações precisas e confiáveis. Em complemento, os pontos restantes foram obtidos através da digitalização de cartas e atlas náuticos disponibilizados pela Diretoria de Hidrologia e Navegação (DHN), garantindo uma cobertura abrangente do ambiente marítimo.

Quanto à topografia do terreno, devido à presença de vegetação de grande porte e ausência de dados topográficos digitais, foi definido uma elevação de 5m para todas as áreas de planícies.

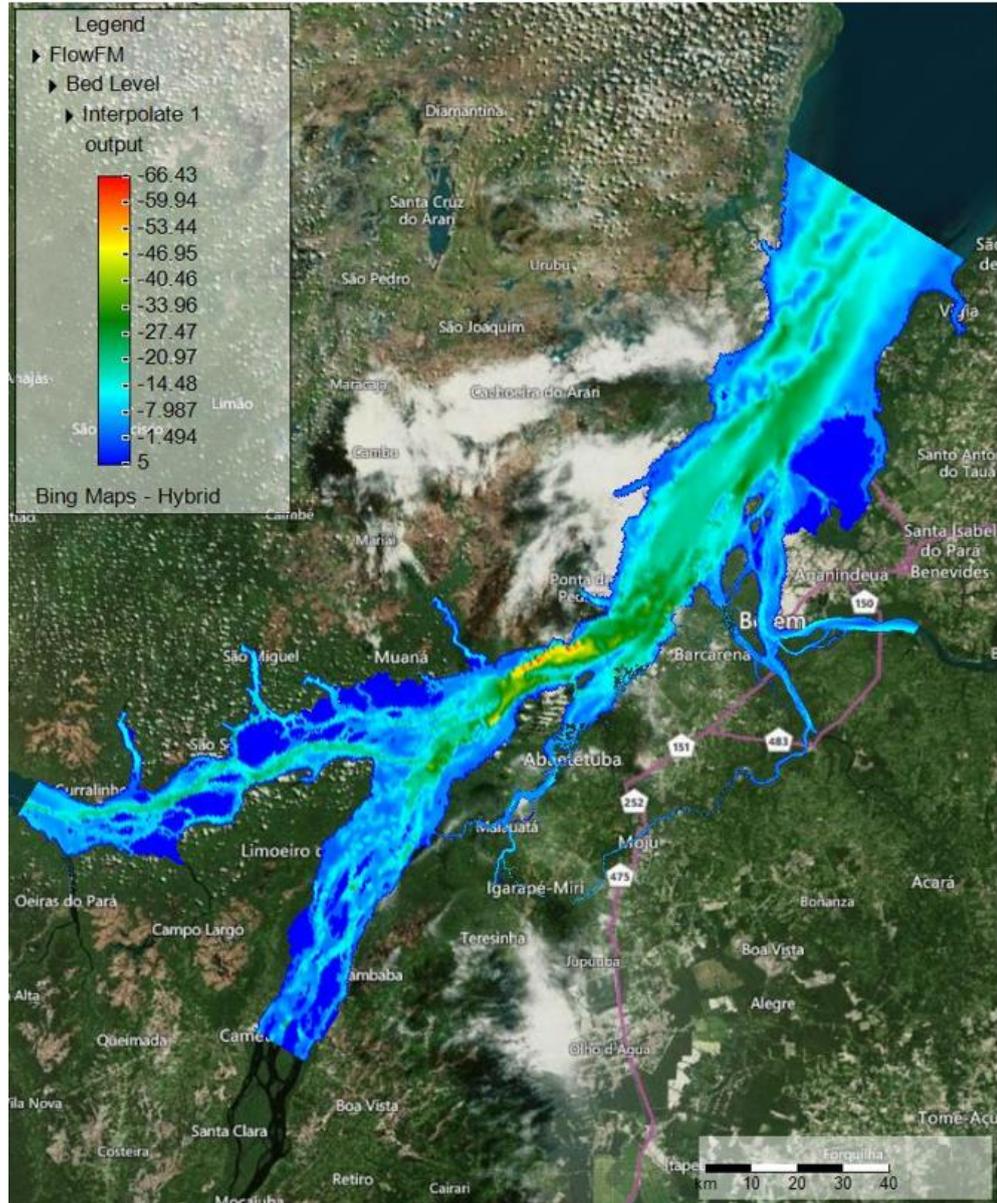


Figura 13: Batimetria interpolada (m) para todo o domínio do modelo com base nas diferentes fontes de dados. Fonte: Lapmar (2023).

A obtenção dos dados de entrada contemplou três forçantes principais: maré, descarga fluvial e vento. A maré e a descarga foram aplicadas apenas nos limites abertos, ao passo que o vento foi considerado constante em todo o domínio do modelo. Para representar a variação da superfície livre causada pela maré, foram realizadas duas configurações, uma correspondente à entrada da maré pela foz do rio Pará e outra próxima ao Estreito de Breves. Em ambas as configurações, foram definidos pontos com especificações de amplitude e fase para 13 harmônicos de maré: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4, MN4. A determinação do número de pontos baseou-se na largura do canal onde se encontravam as seções e suas variações morfológicas.

Os valores de vazão foram obtidos a partir de séries temporais disponíveis no website da Agência Nacional das Águas (ANA - Hidroweb). Esses dados foram adaptados durante o processo de calibração, considerando que as seções fornecidas não estavam alinhadas com as fronteiras do modelo. As estações fluviométricas selecionadas incluíram o rio Amazonas, Xingu, Tapajós, Tocantins, Moju, Acará e Guamá. Para cada uma delas, foram calculadas médias mensais a partir de um conjunto de dados históricos de 30 anos, permitindo representar a descarga líquida em cada estação fluviométrica.

Quanto aos ventos, apesar dos mesmos apresentarem variações espaciais e temporais, foram adotados valores constantes para cada intervalo de tempo, visando garantir maior controle e reprodutibilidade do modelo. Essa abordagem, embora simplificada, contribuiu para a consistência e precisão das simulações hidrodinâmicas, proporcionando celeridade no processamento dos diferentes cenários elencados no capítulo 3.2.5. Os dados de vento de referência foram definidos com base em reanálises de dados obtidos na plataforma Noaa (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

### **3.2.1.1 Calibração do Hidrodinâmico**

A avaliação do desempenho do modelo foi conduzida utilizando métodos estatísticos que medem a similaridade entre os dados simulados e os observados *in-situ*. Para uma avaliação completa, foram empregadas três análises distintas: coeficiente de correlação de Pearson ( $R$ ), coeficiente de eficiência do modelo de Nash – Sutcliffe ( $NSE$ ) e raiz do erro quadrático médio relativo ( $P_{rmse}$ ).

A correlação de Pearson avalia a relação linear entre as variáveis, sendo que valores acima de 90% indicam um bom desempenho do modelo. O  $NSE$  avalia a capacidade do modelo em representar os dados observados, sendo esperado uma eficiência superior a 0,55 para um bom desempenho. Por fim, o  $P_{rmse}$  expressa o erro entre os resultados simulados e os dados observados, com valores inferiores a 20% indicando um bom desempenho. Esses índices estatísticos fornecem uma base objetiva para validar e aprimorar a sua precisão.

Para a calibração e validação do modelo, foram definidos 8 pontos de controle de dados para variação de superfície livre e 12 seções para descarga, conforme as Figuras 14 e 15.

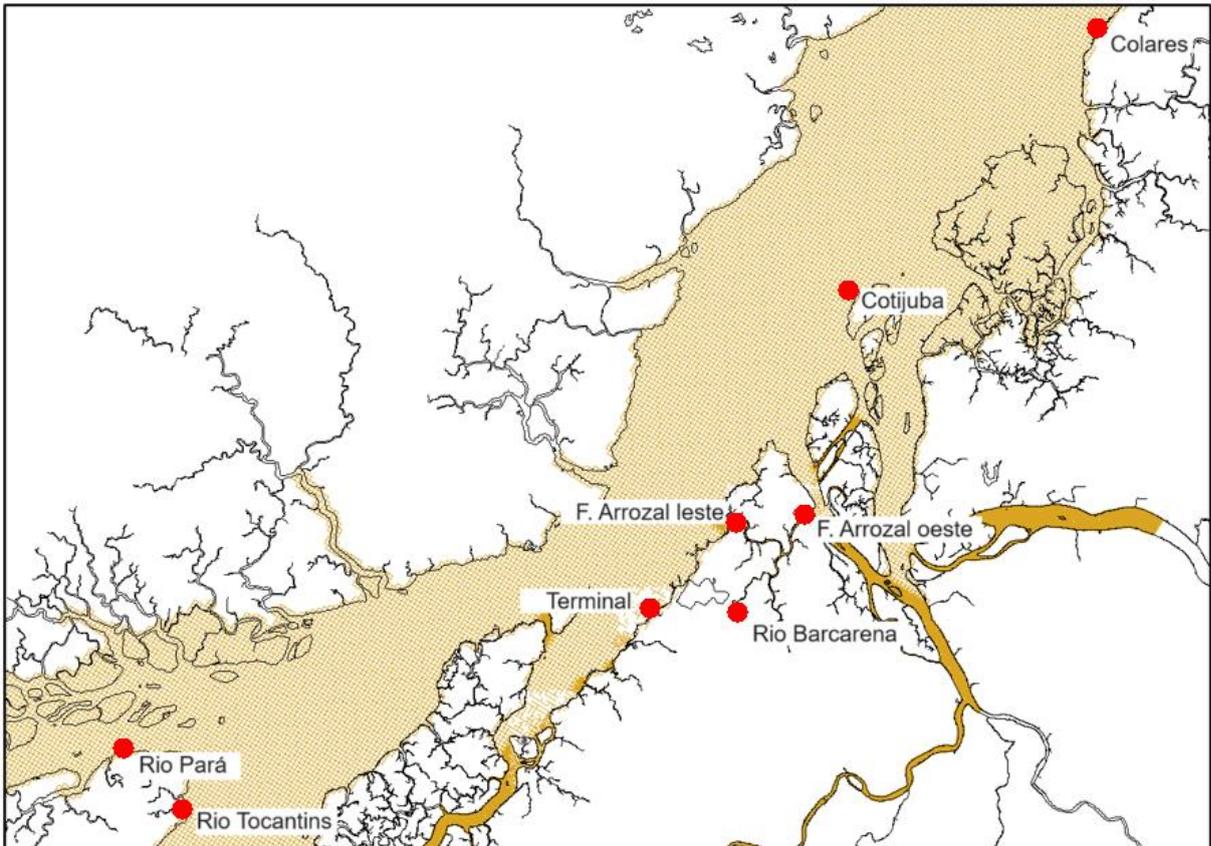


Figura 14: Pontos utilizados para a calibração da variação de superfície livre (maré, em metros) no modelo. Fonte: Adaptado de Lapmar (2023).

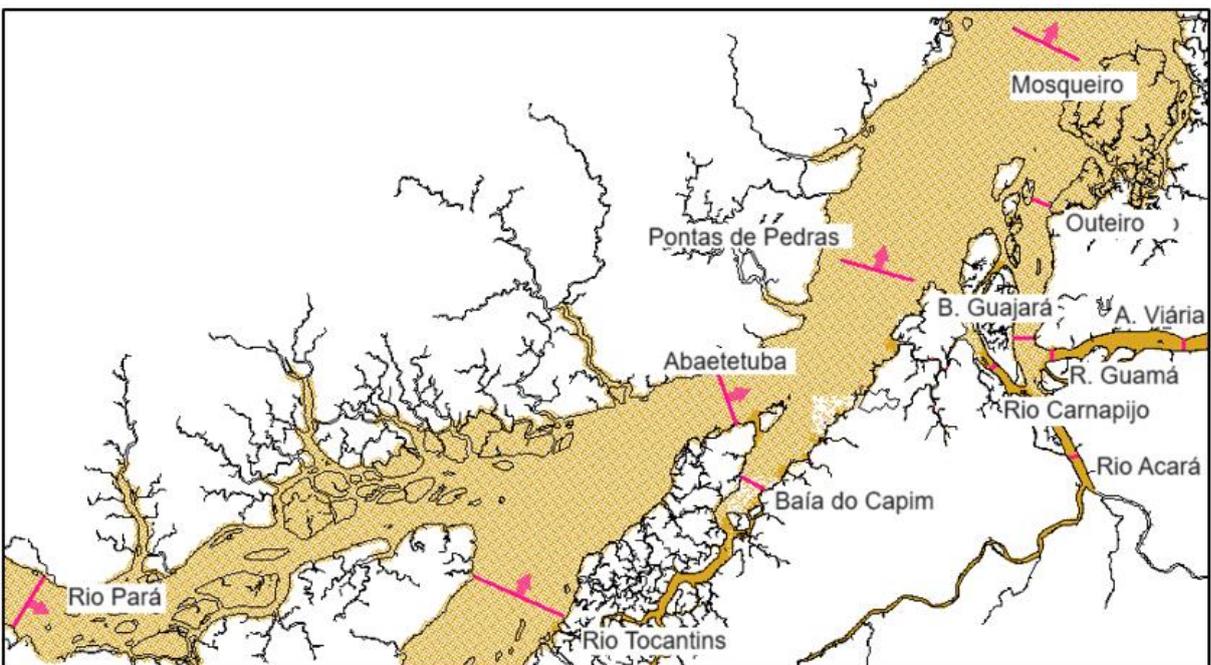


Figura 15: Seções utilizadas para a calibração da descarga (vazão, em  $m^3/s$ ) no modelo. Fonte: Lapmar (2023).

A calibração do modelo hidrodinâmico, para a simulação da entrada da maré no estuário do Rio Pará, revelou resultados satisfatórios. A partir de uma série temporal de 32 dias de dados *in-situ* (suficiente para extrair os principais harmônicos de maré), o modelo foi capaz de reproduzir com precisão os padrões de variação do nível para todos os períodos observados, garantindo uma representação confiável do fenômeno. Quanto aos resultados dos índices de desempenho, destaca-se que o índice *R* apresentou valores superiores a 90% para todos os pontos de interesse, indicando uma correlação boa na representação dos padrões de variação da maré.

O índice *NSE* também demonstrou valores superiores a 0,55 em todos os pontos analisados, reforçando a capacidade do modelo em capturar com precisão as características da maré. Por fim, a avaliação do índice *Prmse* revelou que a maioria dos pontos apresentaram valores abaixo de 15,8%, indicando um baixo erro entre os dados modelados e os observados. Destaca-se que três pontos específicos - Tocantins, Terminal (Barcarena) e Rio Pará (Breves) - mostraram valores de *Prmse* inferiores a 10%, evidenciando um erro ainda menor nessas localidades.

A combinação desses índices estatísticos demonstrou a capacidade do modelo de reproduzir de forma precisa e confiável os padrões de variação da maré. Variável fundamental para estudos de impacto ambiental, gestão costeira e outras aplicações relacionadas ao ambiente estuarino. Fortalecendo a confiança na utilização desse modelo para a simulação de transporte de plásticos.

Diferentemente dos dados de maré, a vazão precisou ser simulada exatamente para o mesmo período dos dados observados. Por conseguinte, o modelo foi rodado para dez períodos distintos de acordo com a data de levantamento de dados *in-situ*, abrangendo diferentes momentos temporais ao longo do ano. Essa abordagem permitiu uma calibração simultânea do modelo em diferentes datas, dispensando a validação tradicional dos dados.

Os resultados dos índices de desempenho indicam que o modelo foi eficiente na representação do campo de velocidade no estuário do Rio Pará. Tanto o índice *R*, com valores superiores a 90%, quanto o índice *NSE*, com valores superiores a 0,55, demonstraram satisfatória concordância entre os dados observados e simulados em grande parte das seções avaliadas. Da mesma forma, o índice *Prmse* apresentou valores abaixo de 20% para a maioria das seções. No entanto, algumas seções específicas em outubro de 2019 (Guamá, Rio Pará em

breves, Ponta de pedras, Baía do Capim e Alça viária) e maio de 2021 (Alça viária) apresentaram exceções nos três índices mencionados.

Destaca-se a seção da Alça Viária, que mostrou os piores índices tanto em outubro de 2019 ( $R=56\%$ ,  $NSE=0,22$ ,  $Prmse=32\%$ ) quanto em maio de 2021 ( $R=88\%$ ,  $NSE=0,25$ ,  $Prmse=30.3\%$ ), indicando uma grande influência da proximidade da borda do modelo com a seção de referência. No entanto, a seção localizada na Baía do Guajará (um pouco mais distante da fronteira) demonstrou-se eficiente para a representação do campo de velocidade, com valores de  $R$ ,  $NSE$  e  $Prmse$  favoráveis, 92%, 0,80 e 15,25%, respectivamente.

Conclui-se que a região da Baía do Guajará, área de interesse deste trabalho, está calibrada e validada para a análise do campo de velocidade e variação da superfície livre para os 10 cenários simulados ao longo do ano, sendo capaz de representar as características do estuário de forma fidedigna.

### 3.2.2 Modelo de qualidade de água

O Modelo de Qualidade da Água (D-Waq) é amplamente empregado para prever processos hidrodinâmicos, transporte de sedimentos e qualidade da água em ambientes aquáticos, como rios, estuários, lagos e oceanos (Deltares 2024b). O modelo permite avaliar o impacto de diferentes cenários e intervenções no ambiente aquático, incluindo substâncias como traçadores, salinidade, concentração de nutrientes e poluentes.

O submódulo básico de transporte de matéria inorgânica suspensa (variável de estado IM1) é um conjunto predefinido de processos e variáveis editáveis, no qual o próprio programa utiliza a equação de advecção-difusão-reação para compreender o comportamento da matéria suspensa particulada, considerando tanto processos advectivos (transporte pela corrente) quanto difusivos (todo aquele que não é descrito pelo transporte advectivo) (Deltares 2024b, Deltares 2024c). Conforme a Equação central:

$$\partial C / \partial t = -u * \partial C + \partial *(D * \partial C) + S + f_R *(c, t) \quad (2)$$

Onde:  $-u$  é a velocidade do fluxo;  $\partial C$  é o gradiente de concentração (em  $x,y,z$ );  $D$  é o tensor de difusão;  $f_R^*(c, t)$  representa as reações (biológicas, bacteriológicas, químicas e outras); e  $S$  representa a entrada (fonte) ou saída (sumidouro) da substância por unidade de área.

No modelo, as fronteiras abertas podem tanto introduzir massa (fonte) como também removê-la (sumidouros). O fluxo de água que entra ou sai da área modelada pelos limites é controlado pelo modelo hidrodinâmico acoplado. Neste estudo, as fronteiras abertas serão consideradas apenas como sumidouros para o transporte de plástico lançado pontualmente, não atuando como fonte de substâncias.

Em resumo, o balanço de massa proporciona uma estrutura matemática capaz de entender, com os devidos ajustes para o interesse do trabalho, como o transporte de matéria inorgânica (parametrizado para o plástico) em suspensão varia no espaço e no tempo. Dessa forma, este capítulo propõe uma análise das etapas metodológicas para investigar o transporte de plásticos através do modelo de qualidade da água, com base na idade da massa d'água, na estimativa da capacidade de renovação e no tempo de residência da Baía.

### 3.2.3 Escalas de tempo

As escalas de tempo no estudo da qualidade ambiental de corpos d'água ajudam a entender o comportamento de uma parcela de água dentro de um sistema, inferindo sua sensibilidade ambiental e transporte de substâncias. Os três principais parâmetros que envolvem as escalas de tempo são: Tempo de descarga (ou, como adotado neste trabalho, tempo de renovação), tempo de residência e idade da água (Monsen *et al.* 2002). As definições desses parâmetros podem apresentar variações dependendo dos autores.

De maneira geral, o tempo de renovação é o período necessário para que as águas iniciais de uma sub-região ou de todo o sistema estuarino sejam completamente substituídas pela descarga fluvial e entrada da maré (Fischer *et al.* 1979, Miller & Mcpherson 1991). A idade da água refere-se ao tempo que uma parcela de água oriunda de uma fonte, geralmente localizada mais a montante, leva para chegar a um determinado local dentro do sistema (Zimmermar 1988). A idade da água varia conforme a fonte e o ponto de controle analisado. O tempo de residência é o decurso que essa parcela de água introduzida dentro de um corpo hídrico leva para sair do sistema pela primeira vez (Dronkers & Zimmerman 1982, Monsen *et al.* 2002), ou

seja, é o tempo que uma massa d'água rastreada permanece no ambiente de interesse, como um lago, baía ou estuário, até seu deságue no oceano ou estuário adjacente.

Todos esses parâmetros são relevantes e se complementam no estudo da qualidade ambiental. O tempo de residência, particularmente, é crucial para este trabalho, pois tempos de residência mais longos indicam um maior potencial de contaminação de um determinado efluente urbano dentro do sistema. Além disso, embora esse parâmetro possa ser aplicado em outros estudos, como na floração de algas e no transporte de sedimentos, ele reforça as discussões e resultados do transporte de resíduos plásticos. Isso ocorre porque tanto o parâmetro quanto os resíduos tiveram o mesmo ponto de lançamento na simulação, o que facilita a compreensão da variabilidade sazonal do transporte de plásticos em um sistema estuarino dominado por maré.

### 3.2.3.1 Tempo de renovação

Embora existam métodos diversos para determinar o tempo de renovação, este estudo adotou uma abordagem simplificada que se baseia no tempo necessário para que a introdução de águas externas renove e reduza a massa de uma substância conservativa distribuída uniformemente dentro de um corpo hídrico. Abordagens semelhantes foram detalhadas por Li (2010), HydroQual-HDR (2013) e Brooks *et al.* (1999).

Com base nessa definição, a primeira etapa para entender o transporte de plástico envolveu a análise do tempo de renovação das águas do modelo hidrodinâmico acoplado. Especificamente, foi necessário determinar a taxa com que a massa de um traçador conservativo era reduzida ao longo do tempo devido à entrada de águas novas (livres de traçadores) pelas fronteiras abertas do modelo. Para as configurações do software, foi estabelecida uma concentração de 1 g/m<sup>3</sup> para um traçador conservativo (cTR1) presente nas águas iniciais. Em contraste, fora dos limites abertos, como maré e descarga, foi definido um valor de 0 g/m<sup>3</sup>, conforme o Manual do usuário D-Waq (Deltares 2024b).

Essa etapa permitiu estimar, com base na concentração final do traçador ao longo do tempo, o número de dias necessários para que a renovação parcial da substância (>63%) ocorresse nas regiões de controle devido à descarga fluvial e às oscilações das marés. Os resultados desse estudo sobre o tempo de renovação ajudam a definir melhor o local de lançamento de resíduos e os pontos de observação, proporcionando cenários mais precisos.

### 3.2.3.2 Idade da água e Tempo de residência

Após o entendimento do tempo de renovação do sistema como um todo, a segunda etapa consistiu na realização de simulações para verificar o tempo de transporte da água desde a fronteira continental do modelo até determinados pontos de controle (Idade da água continental) e de uma fonte pontual, dentro da Baía do Guajará, até a saída do sistema (Tempo de residência). O tempo médio decorrido do início do lançamento (seja na fronteira aberta, seja por uma fonte pontual) até o ponto de observação escolhido, é conhecido como a idade da água. Para estes cálculos o módulo D-Waq utiliza a seguinte equação:

$$Age_{tr} = \ln(Cd_{tr}/Cc_{tr})/Td_{tr} \quad (3)$$

Onde:  $Age_{tr}$  é a Idade do traçador (d);  $Cd_{tr}$  é a concentração do traçador não conservativo ( $g/m^3$ );  $Cc_{tr}$  é a concentração do traçador conservativo ( $g/m^3$ ); e  $Td_{tr}$  é a Taxa de decaimento de primeira ordem do traçador não conservativo (1/d).

Conforme o manual, Deltares (2024b), foram lançados simultaneamente dois traçadores, um conservativo (cTR1) e outro não conservativo (dTR1), sendo este último dependente do decaimento de primeira ordem do primeiro. Ambos os traçadores foram lançados com a mesma concentração ( $10 g/m^3$ ), sob uma taxa de decaimento igual a 0,01 (1/d), em um ambiente inicialmente livre da substância, permitindo que apenas as forçantes hidrodinâmicas fossem as responsáveis pelo transporte e remoção destes.

Essa abordagem proporcionou uma compreensão valiosa do tempo de transporte das substâncias na Baía do Guajará, considerando seu decaimento ao longo do tempo. Isso possibilitou um melhor entendimento sobre os possíveis fatores responsáveis por zonas sumidouros de plásticos nestes ambientes estuarinos dominados por marés assimétricas.

### 3.2.4 Parametrização da substância

Na terceira e última etapa, foi realizada a parametrização de uma substância do tipo Matéria Inorgânica (IM1) para representar o transporte de plásticos no ambiente aquático. Esta substância foi configurada adotando características específicas, como tamanho de grão (0,005m, ou 5mm, isto é, macroplástico) e densidade aparente ( $900 kg/m^3$ , ou  $0,90 g/cm^3$ ), que refletem as propriedades de grande parte dos plásticos consumidos no Brasil, na maioria feitos

de Polipropileno - PP (Atlas do Plástico 2020; Abiplast 2019), cuja densidade é inferior à da água.

Além disso, foram ajustados e minimizados os parâmetros de interação da substância com os outros processos disponíveis no módulo de qualidade da água do *software* utilizado, como sedimentação, floculação e resuspensão, a fim de isolar o transporte da substância, replicando as condições dos traçadores conservativos.

Dessa forma, foi simulado um lançamento de carga poluente de 1,17 g/s (Tabela 2) de resíduos plásticos, durante seis (06) horas contínuas de maré vazante, a partir da foz do rio Tamandaré (Figura 16), nos diferentes cenários descritos no capítulo 3.2.5. O valor de 1,17 g/s foi calculado usando como base a estimativa para um ano feita por Rosa (2021), que estimou um aporte anual de 3 a 6 toneladas de plásticos superficiais proveniente dos rios Tamandaré e Tucunduba, respectivamente. Estes dois rios, somados, representam um aporte inferido de plásticos superficiais para a Baía do Guajará e rio Guamá na ordem de 25.222 g/dia, a partir do qual foi usada a seguinte equação (estimativa [g/dia] / 6 [h] / 60 [min] / 60 [s]) para se adequar ao trabalho, cuja entrada para o modelo deve ser um aporte em g/s.

Considerando que este estudo adotou apenas um ponto de lançamento, e para evitar possíveis erros computacionais do modelo devido a uma carga insignificante de substância, o aporte dos dois rios observados *in loco* (Tucunduba e Tamandaré) foi atribuído apenas ao rio Tamandaré.

Tabela 2: Principais parâmetros mantidos e/ou alterados (negrito) para o modelo de transporte de plástico. Não estão representados na Tabela os demais parâmetros e coeficientes editáveis não considerados pelo *setup* padrão do software. Fonte: O autor.

<b>IM1 – Matéria Inorgânica</b>	
<i>Inicial Value (g/m<sup>3</sup>) - Condição inicial da água no sistema</i>	0
<b><i>Gran size (m) – Tamanho do grão</i></b>	<b>0,005</b>
<i>TauShields - Tensão de cisalhamento de fundo</i>	0,2
<i>Tauc - Tensão de cisalhamento crítico</i>	0,1
<i>Grav. – Gravidade (m/s<sup>2</sup>)</i>	9,8
<i>KnViscos. – Viscosidade cinemática</i>	1e10-6
<b><i>RhoSand (g/m<sup>3</sup>) – Densidade aparente do grão</i></b>	<b>9e10+5</b>
<i>MinDepth (m) – Mínima prof. para sedimentação/resusp.</i>	0,1
<b><i>Zsed – fluxo de sedimentação</i></b>	<b>0</b>
<b><i>Vsed – Velocidade de sedimentação</i></b>	<b>0</b>
<b><i>Load (g/s) – Carga de resíduos</i></b>	<b>1,17</b>

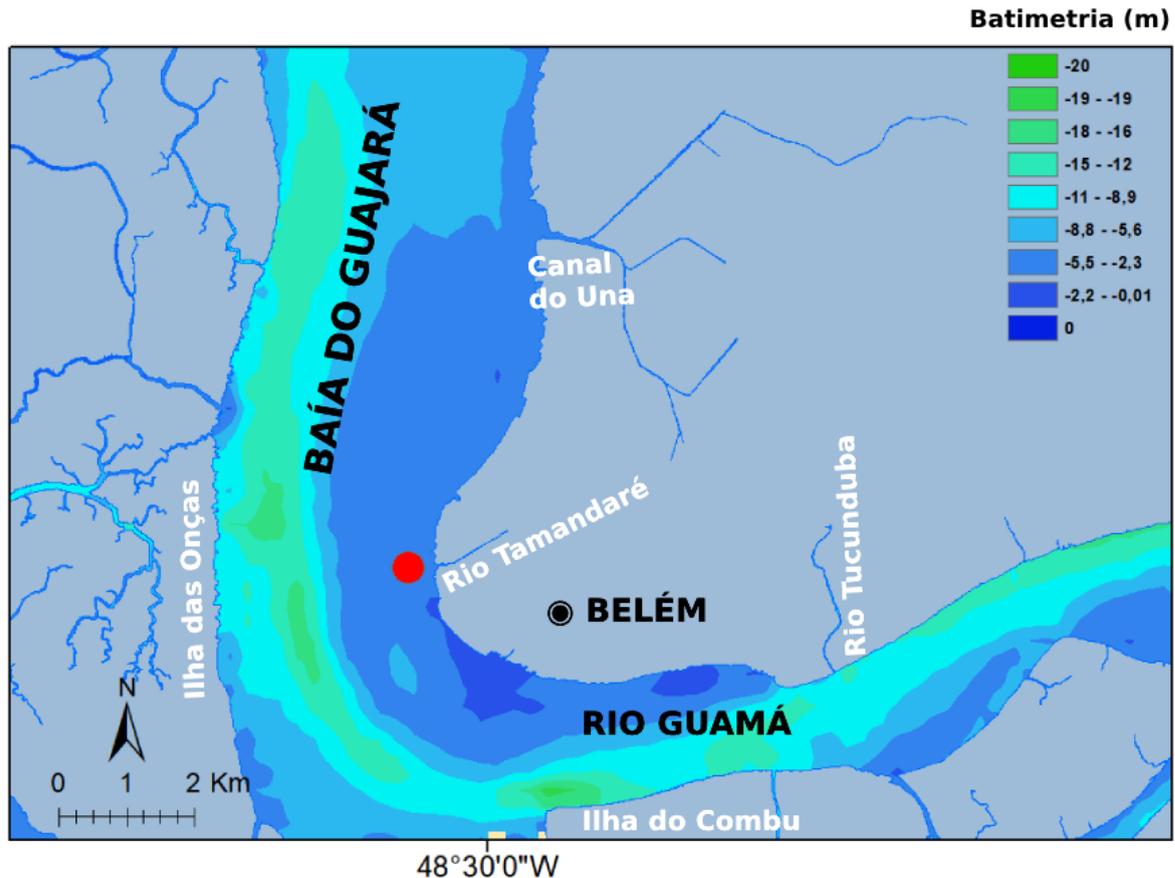


Figura 16: Localização da foz do rio Tamandaré (ponto vermelho), na margem direita da Baía do Guajará, onde ocorreu o lançamento de resíduos plásticos e das parcelas de água para inferir o tempo de residência. A Figura também mostra a batimetria local interpolada (em metros). Fonte: O autor.

### 3.2.5 Definição dos Cenários

A criação de diferentes cenários computacionais para simular o transporte de plástico no sistema é crucial para uma análise abrangente e detalhada dos processos envolvidos. A fim de capturar a complexidade da hidrodinâmica e do comportamento do plástico em diferentes condições sazonais, foram realizados um total de 08 (oito) cenários distintos, a serem descritos neste capítulo.

Os meses utilizados para representar o período chuvoso e seco abrangem os dias entre 30 de março a 02 de junho e 28 de outubro a 31 de dezembro de 2023, respectivamente, atrelados ao período de simulação do modelo hidrodinâmico acoplado. Para os cenários de transporte de plástico foram consideradas apenas condições hidrodinâmicas extremas (marés de sizígia) enquanto para os demais cenários (Escala de Tempo) considerou-se períodos mais longos (isto é, o período completo do modelo hidrodinâmico acoplado, abrangendo a sizígia e quadratura).

Foram realizados dois experimentos pilotos, um durante o período seco e outro durante o período chuvoso, para analisar o tempo de renovação do sistema. Com base nesses resultados iniciais, foram estabelecidos mais seis cenários distintos para a região da Baía do Guajará. Destes, dois foram dedicados à análise da idade da água continental, dois para avaliar a idade da água proveniente de uma fonte pontual localizada no interior da Baía do Guajará até a saída do Sistema (tempo de residência), e, por fim, dois foram para estudar o transporte de plástico. Portanto, foram realizados um total de oito cenários distintos para o estudo ambiental da Baía do Guajará, conforme a lista a seguir, contabilizando os experimentos pilotos:

- Cenário piloto1: tempo de renovação do sistema, período chuvoso
- Cenário piloto2: tempo de renovação do sistema, período seco
- Cenário 1: idade da água continental, período chuvoso
- Cenário 2: idade da água continental, período seco
- Cenário 3: tempo de residência, período chuvoso.
- Cenário 4: tempo de residência, período seco.
- Cenário 5: lançamento do plástico, durante o período chuvoso.
- Cenário 6: lançamento do plástico, durante o período seco.

Segundo Gregório (2008), a Baía do Guajará recebe um grande aporte de efluentes urbanos, incluindo canais e esgotos a céu aberto provenientes da cidade de Belém. Os principais efluentes, que antigamente eram igarapés e furos, são os canais Una, Tamandaré, Quintino, Doca e Tucunduba. Neste trabalho, o ponto de lançamento dos resíduos foi escolhido próximo à foz do rio Tamandaré. Esse local foi selecionado por estar situado na margem direita da Baía do Guajará, onde o modelo hidrodinâmico apresentou índices de calibração satisfatórios. Além disso, a escolha se baseou em recentes dados observacionais pioneiros para a região, sobre a mensuração do aporte de resíduos plásticos no estuário, conforme relatado por Rosa *et al.* (2023).

A análise dos cenários 5 e 6 permitiu uma investigação detalhada do comportamento do plástico diante das variações na superfície livre da água e do campo de velocidade, para diferentes condições oceanográficas. Em ambos os cenários, foi realizado um lançamento de 1,17 g/s de plástico durante uma única maré de vazante, ao longo de 06 (seis) horas contínuas.

Após cessado o aporte deste único período de lançamento, foi verificado o comportamento dos resíduos no decorrer dos próximos 06 dias de simulação (em sizígia), buscando identificar zonas de acúmulo ou principais vias de transporte.

Desconsiderando as planícies de inundação, que poderiam intensificar áreas de retenção de plástico, o foco destes cenários (5 e 6) foi exclusivamente a dinâmica de transporte devido à morfologia e à hidrodinâmica local. No entanto, é importante mencionar que a vegetação e a urbanização das margens desempenham um papel indireto nos resultados obtidos, devido a escolha do coeficiente de rugosidade no modelo hidrodinâmico acoplado.

A análise dos tempos de renovação do sistema e da idade da água, juntamente com o estudo do transporte de plástico em diferentes condições sazonais, buscou proporcionar uma compreensão abrangente do comportamento do plástico. Essa abordagem metodológica considerou uma variedade de cenários realistas e relevantes para as condições ambientais observadas em estuários amazônicos dominados por marés semidiurnas e assimétricas.

A posição dos pontos de observações eulerianos para os cenários 1 e 2 (a fim de reproduzir uma rota de idade da água continental em direção a foz) podem ser observados na Figura 17. Os pontos de observações para os cenários 3, 4, 5 e 6 podem ser visualizados na Figura 18. O ponto de lançamento da carga poluente nos cenários 3, 4, 5 e 6 são os mesmos, podendo ser observados na Figura 18.

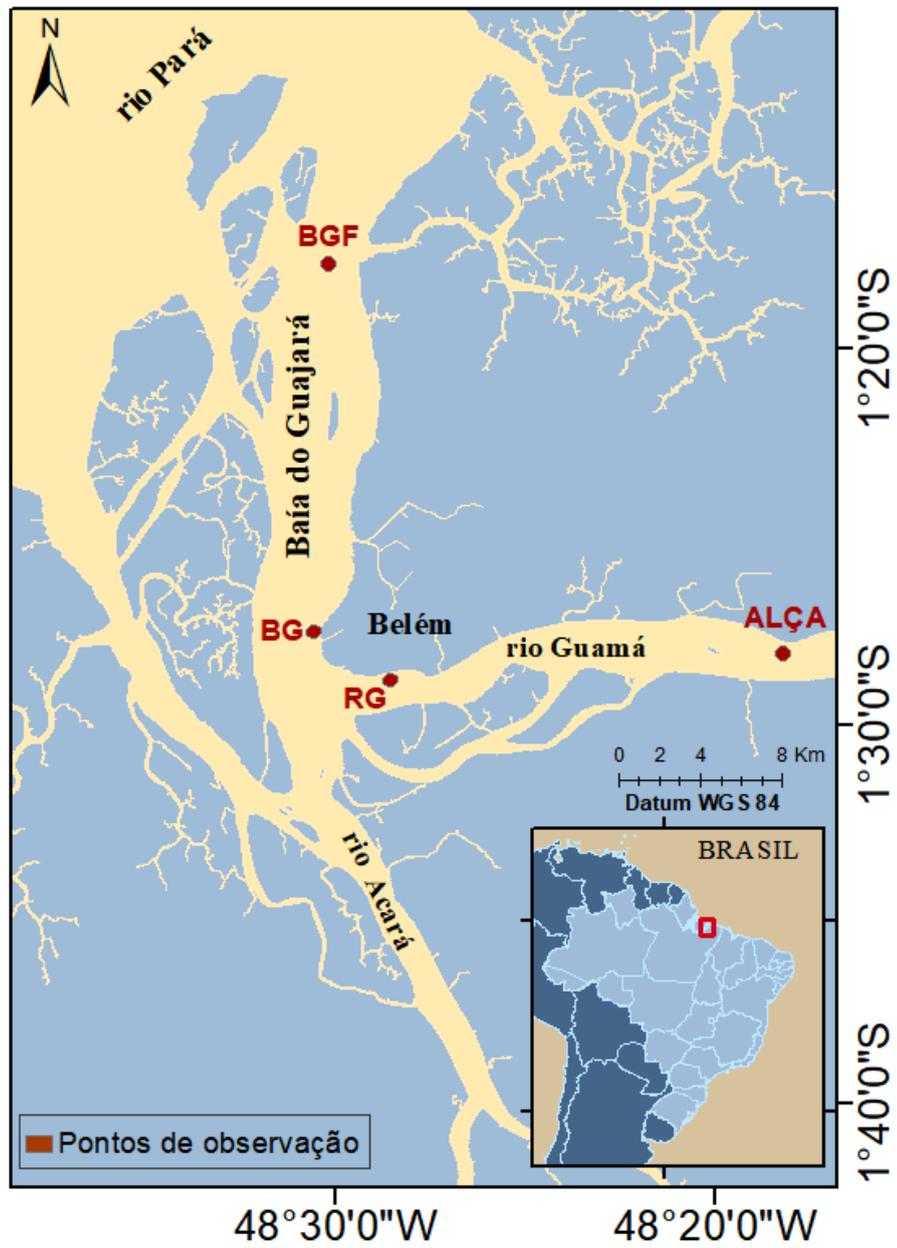


Figura 17: Localização dos pontos de observações para os cenários de idade da água: Alça Viária - ALÇA; foz do Rio Guamá - RG; Baía do Guajará, próximo a foz do rio Tamandaré- BG; e Foz da Baía do Guajará – BGF. Fonte: O autor.

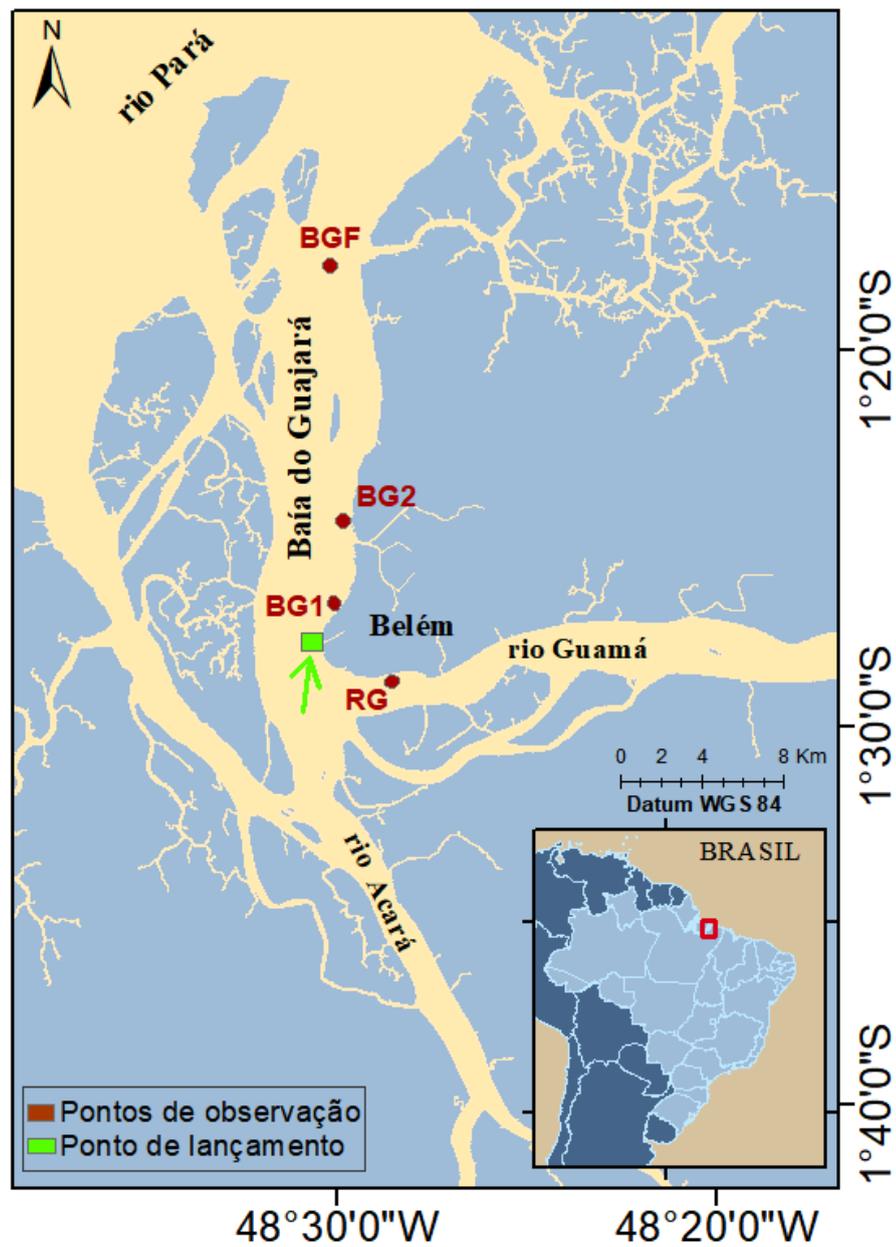


Figura 18: Localização do ponto de lançamento (seta verde) dos resíduos nos cenários 3, 4, 5 e 6, e os seus respectivos pontos de observações: foz do Rio Guamá - RG; Baía do Guajará, próximo ao porto de Belém- BG1; Baía do Guajará, próximo ao canal do Una - BG2, Foz da Baía do Guajará - BGF. Fonte: O autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CENÁRIO PILOTO: TEMPO DE RENOVAÇÃO – PERÍODO CHUVOSO E SECO

A criação de um cenário piloto para investigar o tempo de renovação da Baía do Guajará é de suma importância para compreender o tempo de permanência das águas estacionárias e o padrão de dispersão de substâncias inseridas posteriormente no modelo, como resíduos plásticos, em diferentes condições sazonais.

Durante o período chuvoso, a partir do sexto dia de simulação, a porção da Baía mais próxima da fronteira (RG) já apresentava uma concentração do traçador inferior a  $0,3 \text{ g/m}^3$  (>70% de renovação) (Figura 19b). No vigésimo quarto dia (Figura 19c), tanto a porção interna (RG) quanto a externa (BGF) da Baía apresentaram uma taxa de renovação superior a 90%. No último dia (64º dia), foram observados valores ainda menores (Figura 19d), com uma concentração ínfima abaixo de  $0,001 \text{ g/m}^3$  (>99,9% de renovação).

Durante o período seco, o tempo de renovação das águas iniciais foi significativamente maior do que no período chuvoso, provavelmente devido à diminuição acentuada do aporte fluvial e à maior influência da maré como força oposta ao escoamento. Essa diferença é evidenciada pela variabilidade espaço-temporal da concentração do traçador ao longo dos 64 dias de simulação (Figuras 20a, b, c e d). Após 24 dias, a taxa de renovação variou de 28% a 37% em RG e foi inferior a 20% em BGF (Figura 20c). A taxa de renovação só ultrapassou 70% após 2 meses de simulação (64º dia), e apenas na porção mais interna (RG), enquanto na região externa (BGF) a taxa renovação manteve-se em média inferior a 60%.

Estes resultados indicam que, para as configurações adotadas neste trabalho (descarga fluvial, entrada da maré, e distâncias das fronteiras abertas em relação a área de interesse), a descarga fluvial foi a principal responsável por promover a lavagem das águas da Baía do Guajará.

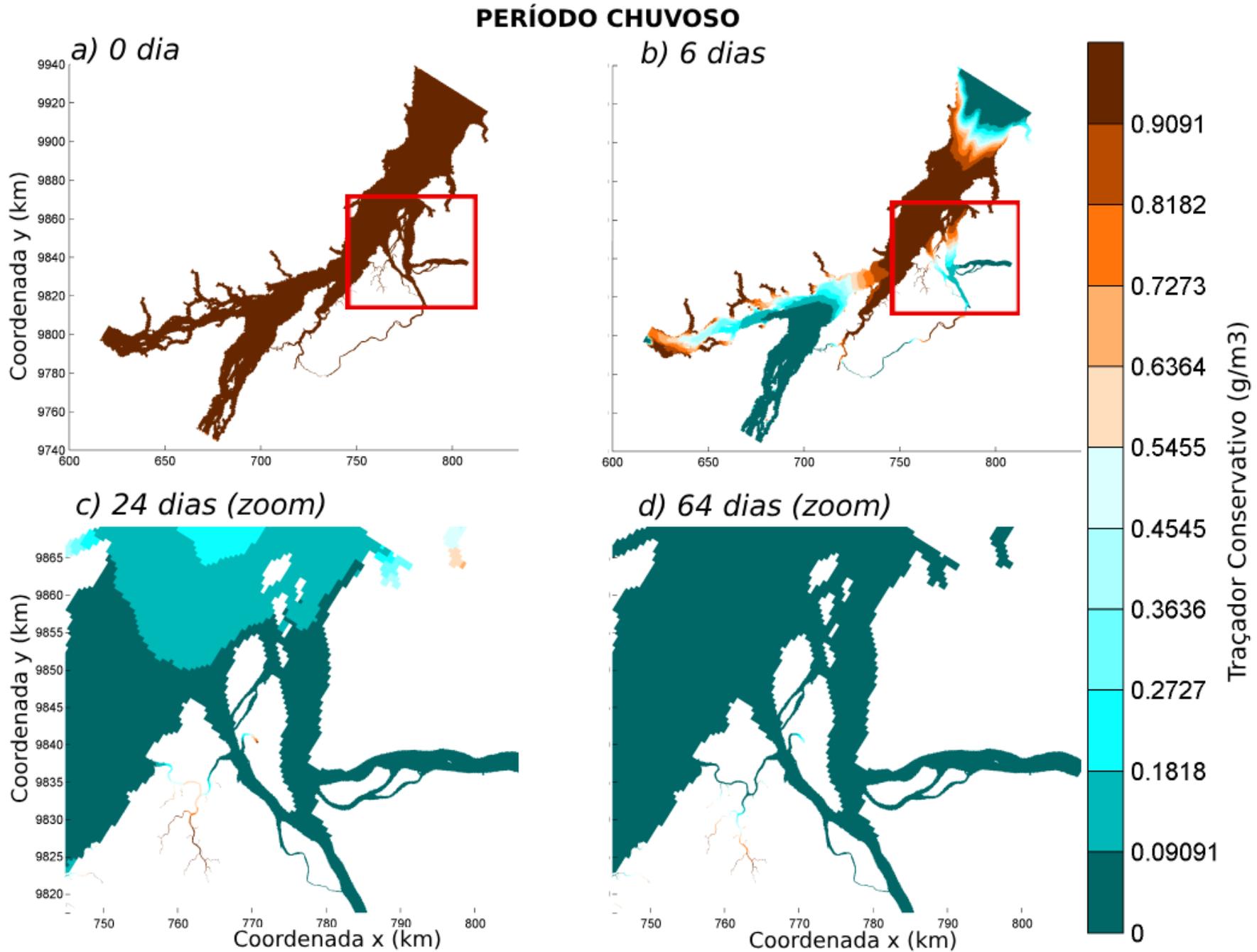


Figura 19: Escala de tempo para a renovação das águas iniciais presentes no modelo, inferida com base no tempo de lavagem da concentração do traçador conservativo durante o período chuvoso, referente: a) ao dia zero (anterior ao início da simulação); b) após 6 dias de simulação; c) após 24 dias de simulação (zoom); e d) após 64 dias (zoom). Imagens capturadas próximo a preamar. Fonte: O autor.

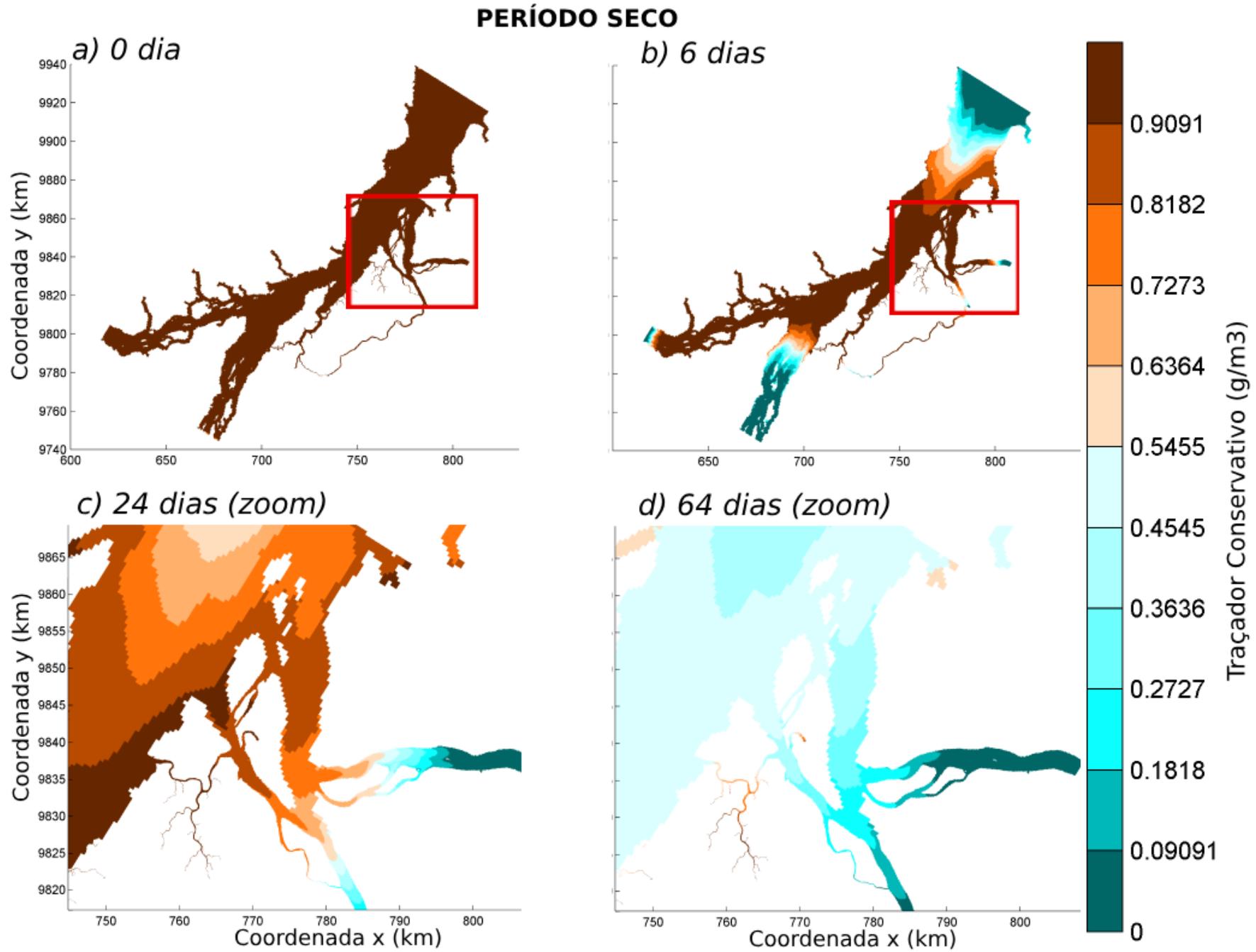


Figura 20: Escala de tempo para a renovação das águas iniciais presentes no modelo, inferida com base no tempo de lavagem da concentração do traçador conservativo durante o período seco, referente: a) ao dia zero (anterior ao início da simulação; b) após 6 dias de simulação; c) após 24 dias de simulação (zoom); e d) após 64 dias (zoom). Imagens capturadas próximo a preamar. Fonte: O autor.

#### 4.2 CENÁRIO 1 E 2: IDADE DA ÁGUA CONTINENTAL – PERÍODO CHUVOSO E SECO

A análise da idade da água continental oferece informações valiosas sobre os padrões de circulação e tempo de drenagem dessas águas desde a fronteira fluvial do modelo até os pontos de controle. As observações realizadas nos pontos de amostragem, que incluem a orla próximo à foz do Rio Tamandaré (BG), foz do rio Guamá (RG), Foz da Baía (BGF) e Alça Viária (ALÇA – montante do rio Guamá), revelaram variabilidades tanto temporais (Figura 21) quanto espaciais (Figura 22 e 23) na dinâmica de transporte de parcelas d'água no sistema.

No período chuvoso (Figura 21a), em ALÇA, a estabilização aparente da curva com os valores de idade da água ao longo do tempo ocorreu a partir do segundo dia de simulação, com uma média de renovação pós estabilização na ordem de 2,28 dias. No RG, a idade média foi de 6,4 dias, com estabilidade a partir do quinto dia. Na Baía (BG), a idade média calculada foi de 8,6 dias, com uma curva mais estável a partir do sétimo dia. Já na foz do sistema (BGF), a média de idade da água registrada foi de 15,32 dias, com uma aparente estabilização da curva a partir do décimo segundo dia.

A análise das variabilidades espaço-temporais da idade da água continental no período de maior descarga, conforme demonstrado na Figura 22, revela que o tempo necessário para que a água da fronteira aberta (Guamá e Acará) alcance toda a zona de confluência do rio Guamá-Baía do Guajará varia em torno de 7,2 a 9,1 dias. Já na região que delimita a foz da Baía do Guajará foi possível observar um intervalo entre 14,55 e 16,36 dias.

No período seco, todos os pontos de controle tiveram um aumento significativo da idade da água continental (Figura 21b). Com destaque ao ponto a montante do rio Guamá (ALÇA) cujo tempo de transporte de água doce quase setuplicou em comparação ao período chuvoso (2,28 dias), atingindo uma média de 15,56 dias. Tal constatação sugere uma desaceleração no movimento das correntes ocasionado pelo menor aporte fluvial característico do período seco, propiciando um aumento do tempo de permanência da substância dentro do sistema e, por isso, tornando o ambiente mais sensível à poluição neste cenário.

Analisando a distribuição espacial das concentrações do traçador conservativo e decadencial no período seco, é evidente que ambos alcançaram a região da Baía do Guajará (Figura 23a, b). Entretanto, é importante ressaltar que os valores observados foram reduzidos,

situando-se com concentrações ao fim de 64 dias  $\leq 5,4 \text{ g/m}^3$  (valor de referência aportado  $10 \text{ g/m}^3$ ).

Estes resultados corroboram com o cenário do Tempo de Renovação para o período seco, onde apenas o rio Guamá apresentou uma taxa de renovação superior a 70%. Com base nas médias das séries temporais (Figura 21b) e nos mapas geoespaciais, é plausível inferir que, no período seco, a idade da água desde a fronteira do modelo até a Baía do Guajará é de aproximadamente 51 dias em BG e 62,2 dias em BGF (Figura 21b e Figura 23c, d).

Portanto, essas análises das escalas de tempo indicaram ser de suma importância para compreender a dinâmica do transporte de substâncias na região, especialmente durante o período seco, que indicou possuir alta sensibilidade a contaminação por poluentes, visto o lento processo de drenagem continental. Além de indicar para trabalhos futuros a necessidade de um tempo de simulação igual ou superior ao utilizado neste estudo ( $\geq 64$  dias).

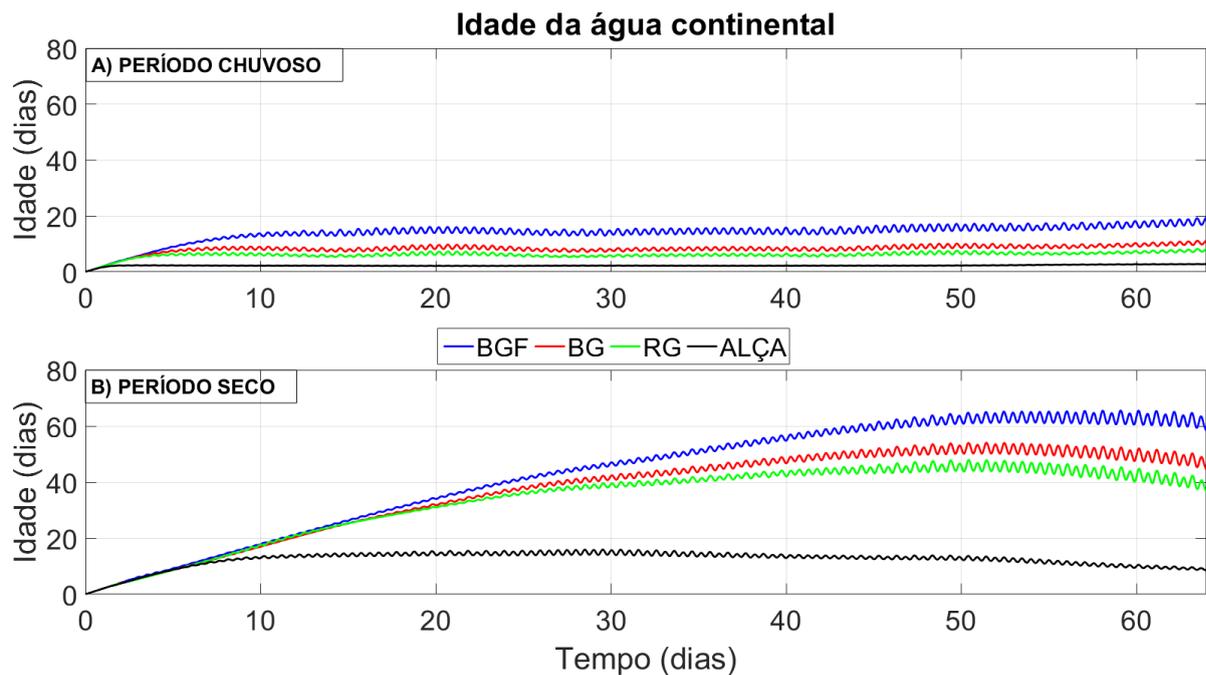


Figura 21: Variabilidade temporal dos valores de idade (AgeTR1) da água continental, em (dias), calculada através do lançamento de um traçador conservativo (cTR1) e decadencial (dTR1), em ( $\text{g/m}^3$ ), durante o período chuvoso (a) e seco (b), ao longo de 64 dias de simulação. Os pontos de controle são: ALÇA; b) RG; c) BG; d) BGF. Fonte: O autor.

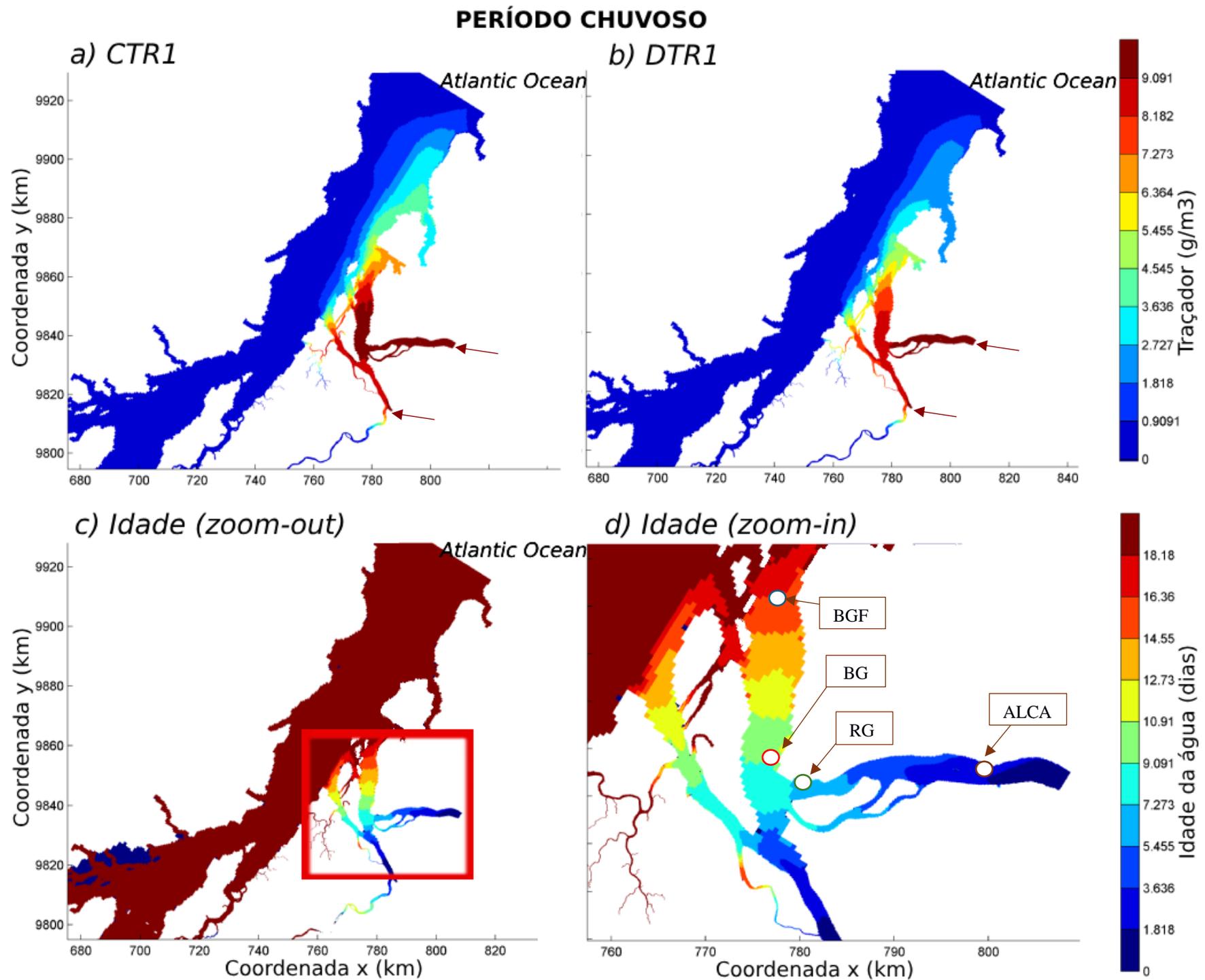


Figura 22: Variabilidade espaço-temporal dos valores de cada traçador: a) traçador conservativo (CTR1) e b) traçador decadencial (DTR1) – a seta vermelha indica as fronteiras de aporte desses traçadores; bem como o cálculo de idade da água continental: c) visão macro – zoom-out d) área de estudo - zoom-in. Todas as figuras foram geradas próximo a preamar no período chuvoso, após 64 dias de simulação. Fonte: O autor.

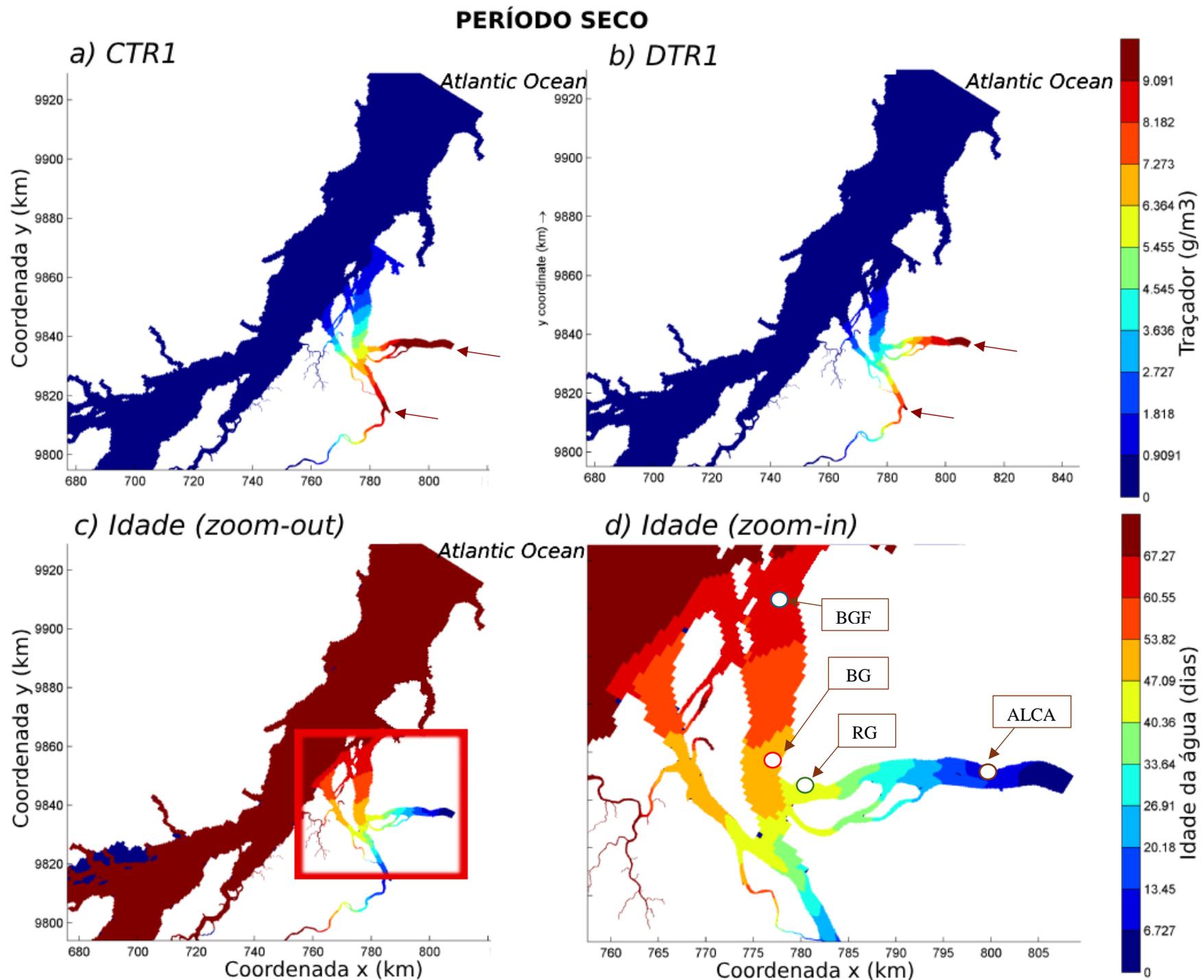


Figura 23 Variabilidade espaço-temporal dos valores de cada traçador: a) traçador conservativo (CTR1) e b) traçador decadencial (DTR1) – a seta vermelha indica as fronteiras de aporte desses traçadores; bem como o cálculo de idade da água continental: c) zoom macro d) zoom-in. Todas as figuras foram geradas próximo a preamar durante o período seco, após 64 dias de simulação. Fonte: O autor.

#### 4.3 CENÁRIO 3 E 4: TEMPO DE RESIDÊNCIA – PERÍODO CHUVOSO E SECO

O estudo do tempo de residência na Baía do Guajará ajuda a entender o tempo de permanência de substâncias no sistema estuarino em resposta ao lançamento pontual de resíduos dentro de um corpo hídrico semifechado. Foram utilizados traçadores conservativos e decadenciais para inferir a idade da água em parcelas específicas durante os períodos chuvoso e seco. Esses traçadores estimaram o tempo necessário para que uma parcela de água, lançada na foz do rio Tamandaré, percorra todo o sistema de drenagem até sair da Baía do Guajará. Esse cenário destaca a importância da simulação para a gestão e prevenção da poluição na Bacia Hidrográfica do Tamandaré (BHT) e, conseqüentemente, na Baía do Guajará.

No período chuvoso, verificou-se que as águas oriundas do Rio Tamandaré chegaram tanto à jusante (foz da Baía) quanto a montante (adentrando o rio Guamá em direção à cabeceira) e ainda bordejaram toda a ilha turística em frente ao setor sul de Belém (ilha do Combu). A variação da idade desse lançamento de pulso a jusante (BGF), de acordo com o mapa espacial, foi em torno de 7,27 a 10,91 dias (Figura 24). Assim, o tempo aproximado que uma substância lançada continuamente na foz do rio Tamandaré demora para sair da Baía do Guajará e chegar ao rio Pará, durante o período de maior descarga, é de 8,28 dias (média calculada no ponto euleriano – BGF).

No período seco, os marcadores conservativos e decadenciais chegaram tanto à jusante (foz da Baía) quanto a montante (rio Guamá), embora tenham alcançado distâncias significativamente menores em comparação ao período anterior. O mapa espacial (Figura 25) estimou uma variação de idade da água entre 29 e 32,72 dias, tanto na foz da Baía quanto no interior do rio Guamá (próximo à Alça Viária). Após a estabilização aparente da curva, a média pontual da idade da água para o período seco em BGF foi igual a 31,76 dias (tempo de residência).

Os mapas geoespaciais da Figura 26 mostram que o tempo necessário para que as águas do rio Tamandaré alcancem o oceano e deixem o rio Pará é cerca de 36 dias durante o período chuvoso e 63 dias durante o período seco. Essas informações permitem estimar o tempo de transporte dos resíduos lançados na Baía do Guajará após deixarem o sistema, possibilitando a mensuração do impacto do descarte inadequado de detritos para além da área fonte (Bacia Hidrográfica do Tamandaré), servindo como ponto de partida para medidas de mitigação e prevenção de impactos ambientais.

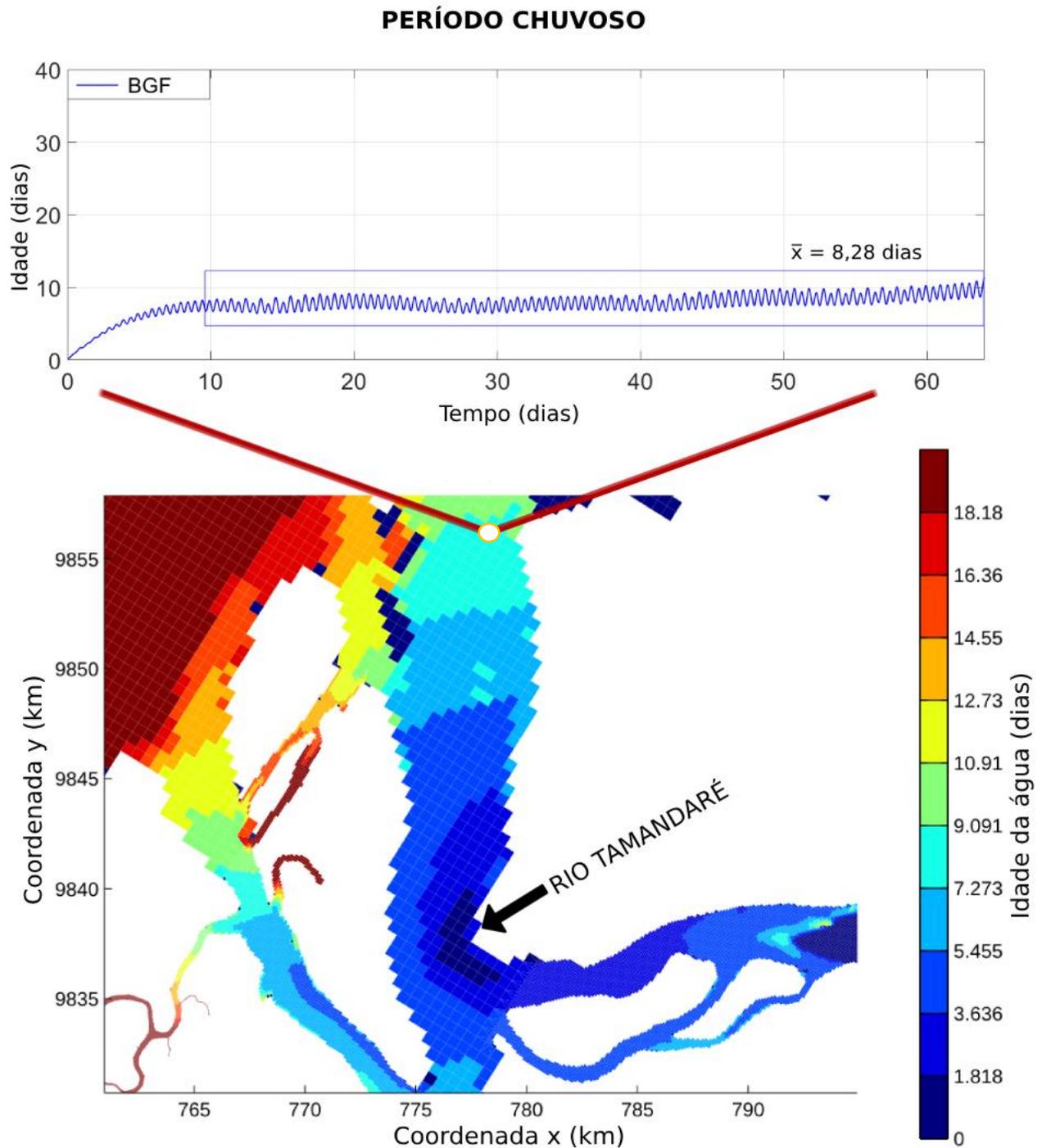


Figura 24: Na parte superior: Série temporal da idade da água no ponto de observação euleriano localizado na foz da Baía do Guajará (BGF) ao longo de 64 dias de simulação, no período chuvoso. Na parte inferior: Variabilidade espaço-temporal da idade da água oriunda de uma fonte pontual, por meio do lançamento de um par de traçadores (conservativo e decadencial) na foz do rio Tamandaré (seta preta), aportados constantemente durante o período chuvoso, ao longo de 64 dias de simulação.

Fonte: O autor.

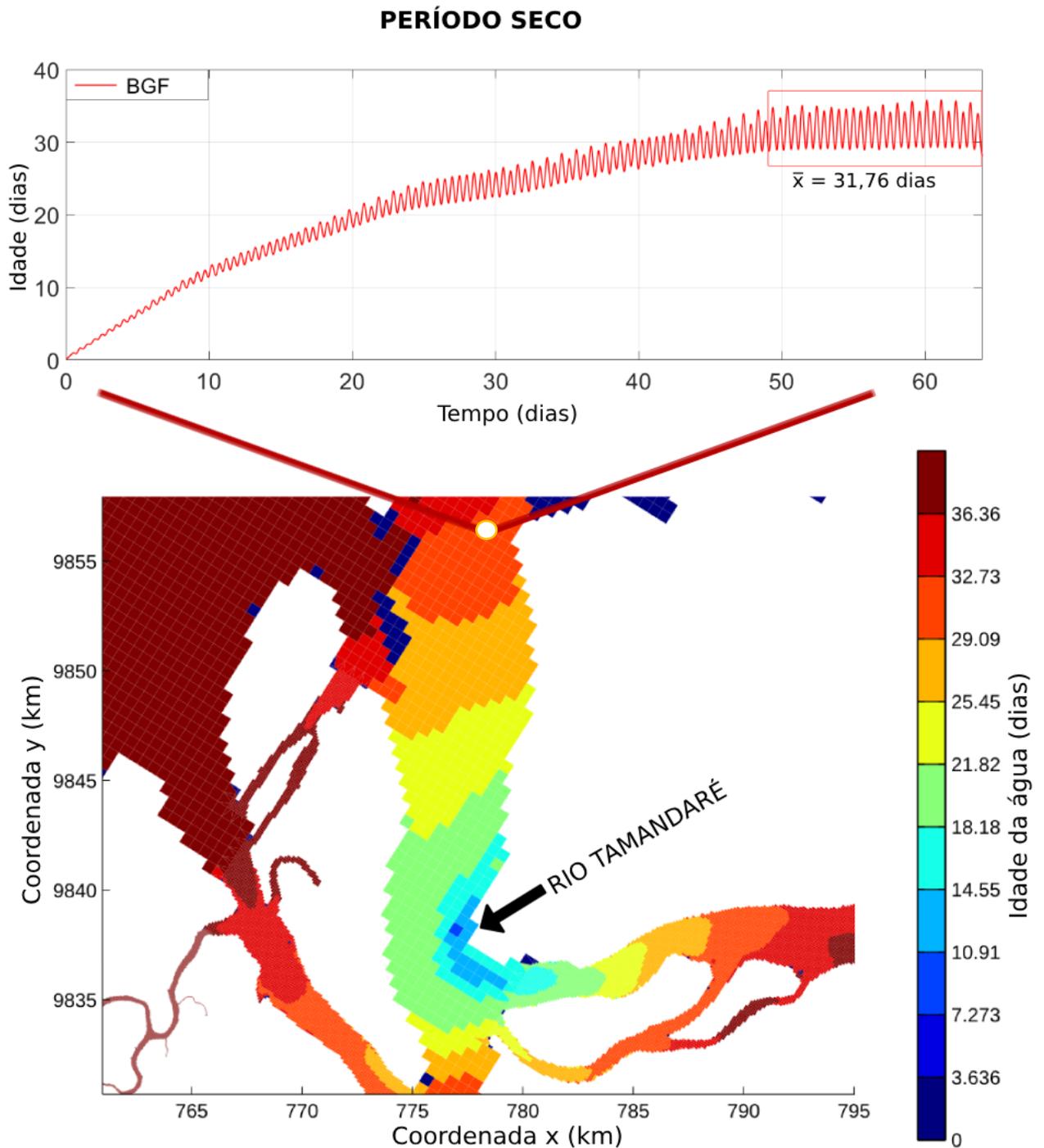


Figura 25: Na parte superior: Série temporal da idade da água no ponto de observação euleriano localizado na foz da Baía do Guajará (BGF) ao longo de 64 dias de simulação, no período seco. Na parte inferior: Variabilidade espaço-temporal da idade da água oriunda de uma fonte pontual, por meio do lançamento de um par de traçadores (conservativo e decadencial) na foz do rio Tamandaré (seta preta), aportados constantemente durante o período seco, ao longo de 64 dias de simulação. Fonte: O autor.

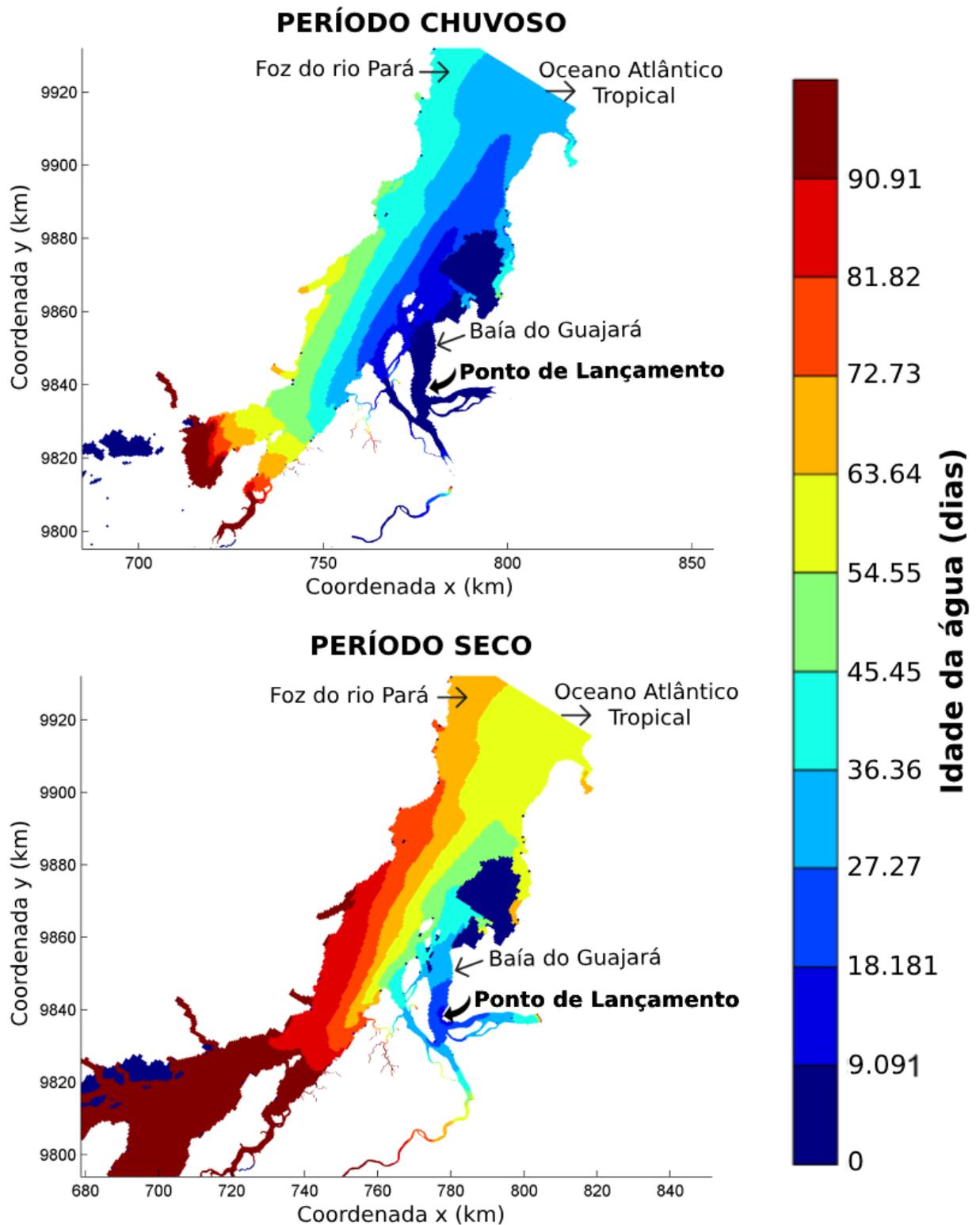


Figura 26: Mapa espaço-temporal da idade da água desde a foz do rio Tamandaré até sua saída do sistema pela Foz da Baía do Guajará, do rio Pará e, conseqüentemente, desaguando no Oceano Atlântico Tropical. A parte superior da figura representa o período chuvoso e a parte inferior o período seco. Fonte: O autor.

#### 4.4 CENÁRIO 5 E 6: LANÇAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS– PERÍODO CHUVOSO E SECO

Após analisar o tempo de permanência das águas na Baía do Guajará em diferentes escalas temporais, este estudo avançou para as simulações do transporte de plástico propriamente dito. Nos cenários chuvoso e seco, foram lançados 1,17 g/s de resíduos plásticos na foz do rio Tamandaré durante uma única maré de vazante, ao longo de 6 horas contínuas. Posteriormente, observou-se o comportamento desses resíduos ao longo de 12 ciclos de marés semidiurnas (6 dias), correspondentes ao ciclo lunar de sizígia. As concentrações de plástico mostraram-se diretamente proporcionais à variação de nível nos pontos a montante do lançamento e inversamente proporcionais nos pontos a jusante, com exceção de BG1.

No ponto BG1, próximo ao porto de Belém, o valor máximo de resíduos registrado durante o período chuvoso foi  $1,1 \times 10^{-4}$  g/m<sup>3</sup>, enquanto no período seco foi  $9,9 \times 10^{-5}$  g/m<sup>3</sup>. No entanto, durante o período seco, a partir do segundo dia após o lançamento, observou-se uma maior capacidade de retenção de plásticos no ambiente. Ao final da simulação, os valores eram quase duas ordens de magnitude superiores ( $5,1 \times 10^{-5}$  g/m<sup>3</sup>) em comparação com o período chuvoso ( $2,9 \times 10^{-7}$  g/m<sup>3</sup>) (Figura 27a, b), fato este também observado em BG2.

Apesar de estar a jusante do ponto de lançamento, BG1 apresentou um aumento inesperado, diretamente proporcional ao aumento do nível d'água (enchente), nas concentrações de resíduos durante o primeiro ciclo de maré. Nas enchentes subsequentes, após o término do lançamento, as concentrações seguiram o padrão previsto, ou seja, foram inversamente proporcionais ao nível d'água. Além disso, durante as marés vazantes, as concentrações de resíduos plásticos permaneceram constantes no ambiente, indicando que a região funciona como uma área de "sombra" para o transporte de resíduos em direção à foz (vazante). Isso sugere que a renovação das águas estacionárias nesta região ocorre apenas durante as marés de enchente.

Em BG2, foram registrados valores máximos de plásticos na ordem de  $1,5 \times 10^{-4}$  e  $1,4 \times 10^{-4}$  g/m<sup>3</sup> para os períodos chuvoso e seco, respectivamente (Figura 27c, d). Durante o período seco, BG2 exibiu variações significativas de resíduos até o fim da simulação. Localizado próximo à porção sul do canal oriental, BG2 desempenha um papel crucial como meio de escoamento do sistema durante a enchente e a vazante. Portanto, não foram observadas circulações restritas em BG2, onde a maioria dos resíduos é transportada gradualmente em direção à foz.

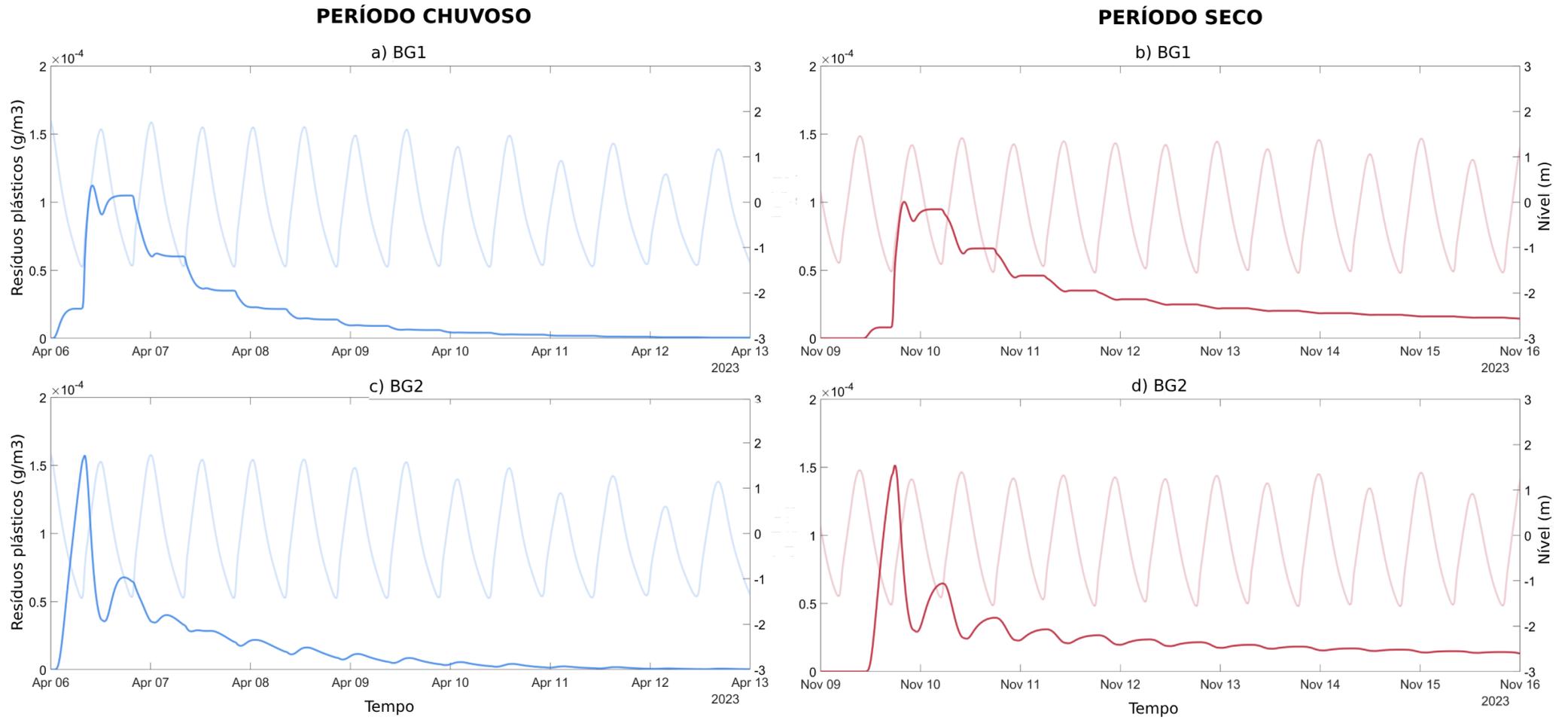


Figura 27: Variabilidade temporal dos pontos de observações eulerianos para acompanhar a concentração do plástico ao longo do período chuvoso (esquerda) e seco (direita), em maré de sizígia. Fonte: O autor.

No ponto situado a montante do lançamento (RG), os valores máximos de resíduos plásticos foram observados durante o período seco, ao contrário dos demais pontos de controle onde os máximos ocorreram no período chuvoso ( $7 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$  e  $5,1 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$  para o período seco e chuvoso, respectivamente) (Figura 28a, b). Em ambos os cenários, os máximos aconteceram durante a estofa de preamar, confirmando o padrão de concentração esperado (diretamente proporcional ao nível) nas áreas a montante do aporte de plástico.

A maior concentração de resíduos registrada em RG durante o período seco, que se mantém significativa até o 12º ciclo semidiurno, pode estar relacionada ao tempo de residência das substâncias dentro do rio Guamá, devido a contínua importação de resíduos provenientes da Baía através das correntes de enchente. Nesta zona de confluência entre o rio Guamá e Baía do Guajará, foi constatado que ocorre, após o término do aporte, uma exportação gradual e lenta dos resíduos aprisionados em RG de volta para a Baía do Guajará, influenciado pela diminuição da capacidade da lavagem continental no período de menor descarga fluvial (idade da água continental > 44 dias).

As configurações morfológicas locais, como a presença de bancos lamosos e baixa cota batimétrica (<4 m) (Gregório 2008), podem favorecer a retenção de resíduos em ambientes de baixa energia. Os resultados em RG sugerem que as correntes de marés desempenham um papel fundamental na importação de substâncias pelo rio Guamá. O período seco mostrou-se mais vulnerável à poluição originada na Baía, retendo esses resíduos no interior do rio Guamá, que, após o término do lançamento de resíduos na Baía, tende a exportá-los novamente para o sistema de origem.

Na foz da Baía do Guajará (BGF), onde os resíduos deixam a área de estudo, as concentrações de plástico começaram a aumentar somente a partir da segunda vazante após o lançamento, durante o período chuvoso (Figura 28c). BGF foi o único ponto de observação que registrou um aumento gradual da substância, atingindo o máximo no terceiro dia ( $2,6 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$ ) após o despejo de resíduos na foz do rio Tamandaré.

Esse fenômeno também foi observado no período seco (Figura 28d), onde a concentração máxima registrada ocorreu após 4 dias ( $1,2 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$ ) do lançamento, devido a lenta capacidade de renovação (60% em BGF em pouco menos de 60 dias) e ao maior tempo de residência das substâncias na Baía (> 30 dias). Em ambos os cenários sazonais, foi evidente a existência de zonas de retenção temporária de resíduos plásticos dentro da Baía do Guajará, as quais exportam esses resíduos gradativamente para o sistema adjacente a jusante (rio Pará).

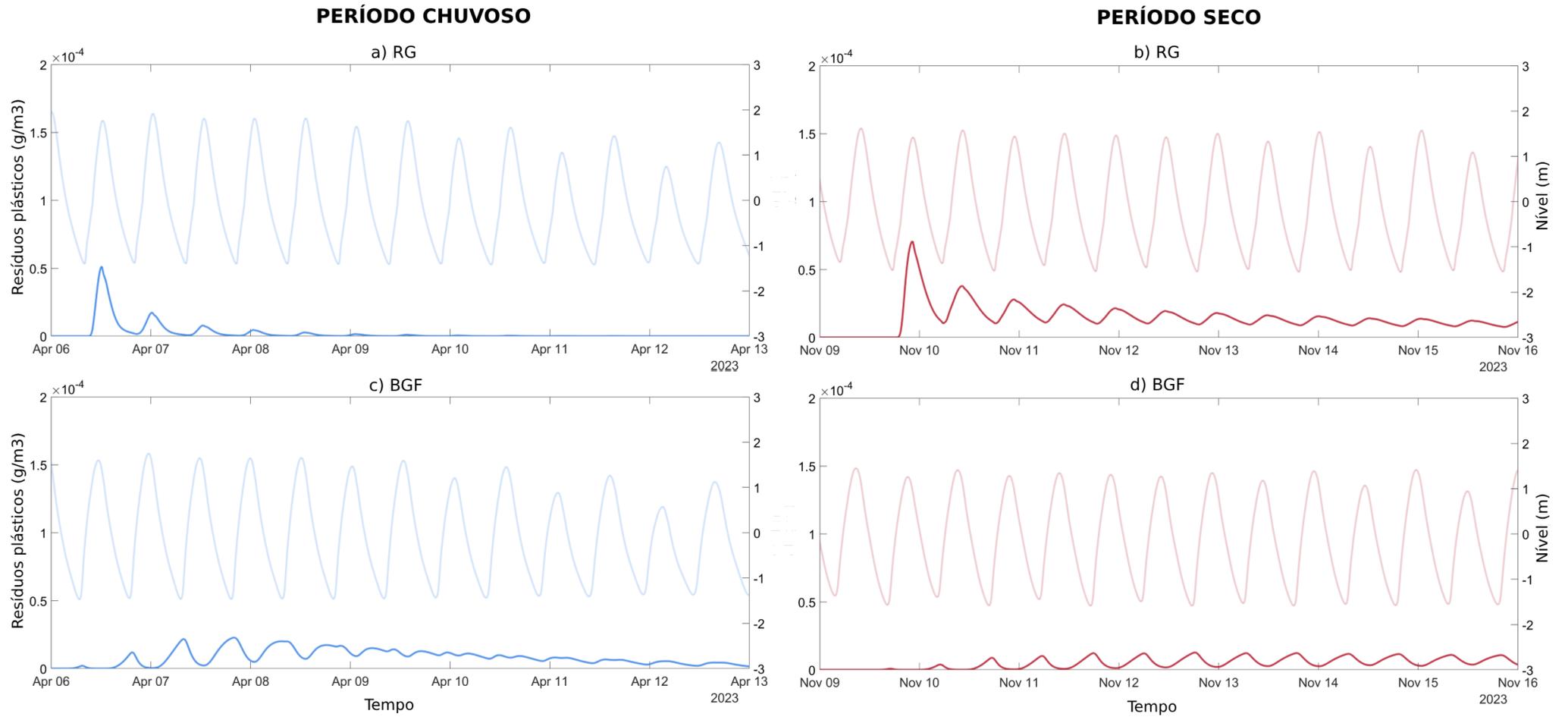


Figura 28: Variabilidade temporal dos pontos de observações eulerianos para acompanhar a concentração do plástico ao longo do período chuvoso (esquerda) e seco (direita), em maré de sizígia. Fonte: O autor.

Na comparação entre os pontos BG1 e BG2, localizados na margem direita da Baía do Guajará, destaca-se a posição geográfica das duas linhas costeiras em relação aos canais de escoamento e fluxo das correntes. Enquanto BG2 possui uma linha costeira paralela ao canal (N-S), BG1 apresenta um certo ângulo de inclinação em relação ao mesmo (NE-SO), sugerindo que BG1 pode apresentar uma circulação restrita "sombra", não correspondente a toda margem direita da Baía do Guajará (Figura 29).

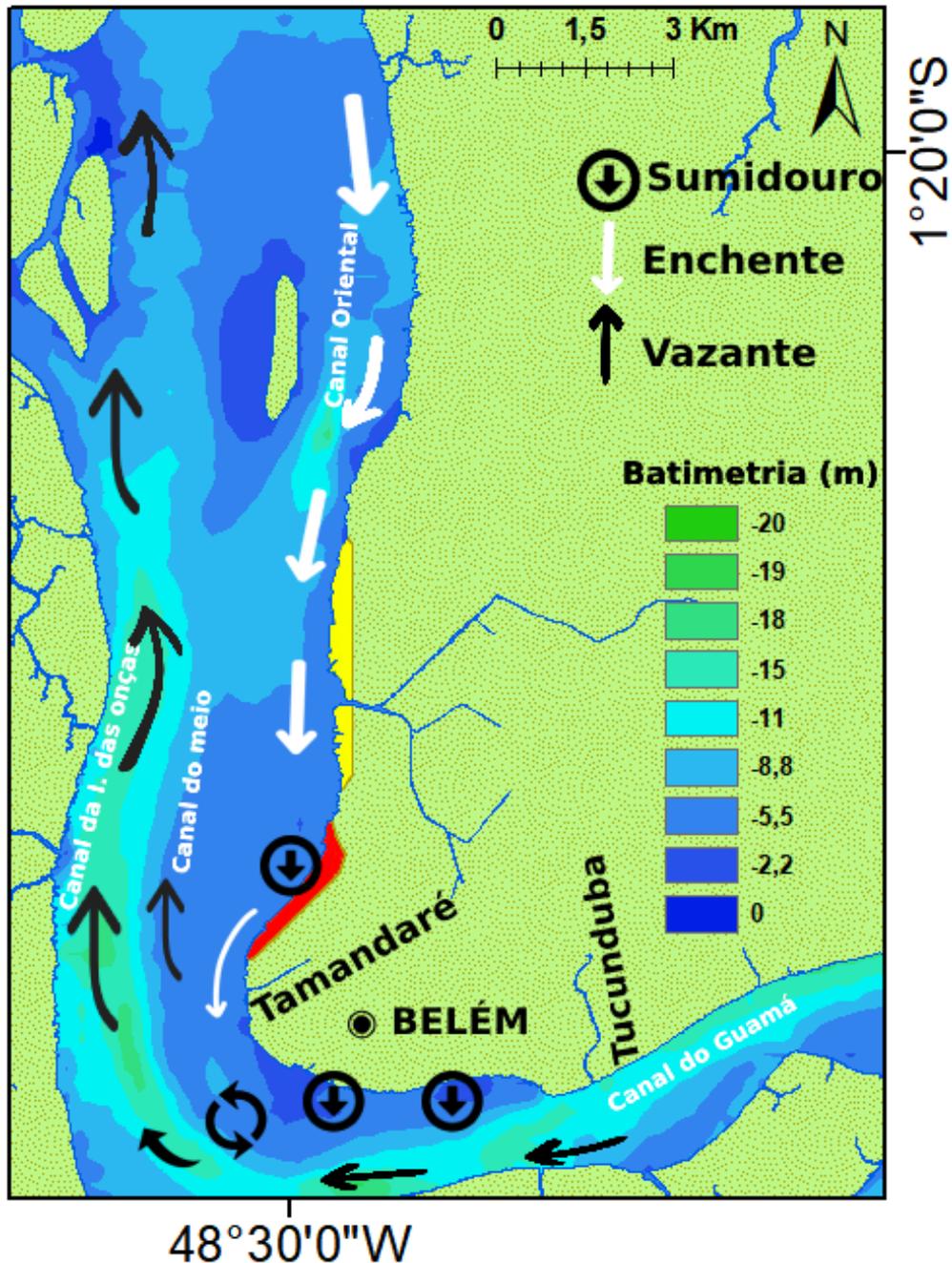


Figura 29: Mapa ilustrativo das zonas de retenção temporária de resíduos plásticos (sumidouros); e a representação da preferência de fluxo (embora bidirecional) ao longo do rio Guamá e Baía do Guajará, com a localização geográfica da linha de costa em BG1 (orientação NE-SO - linha vermelha) e BG2 (orientação N-S - linha amarela) em relação aos canais principais de escoamento (orientação N-S – canal do meio e das onças). Fonte: O autor.

Sabe-se que as correntes de enchente ocorrem principalmente pela margem direita e as correntes de vazantes pela margem esquerda da Baía (Gregório 2008, Bock 2010). Assim, o padrão de circulação restrito sugerido em BG1 aliado ao posicionamento reservado da linha de costa no porto de Belém, pode estar relacionado pela preferência do escoamento dos resíduos plásticos pelo canal do meio (a esquerda) durante a vazante, inserindo e retirando resíduos em BG1 somente durante o fluxo de enchente, conforme a Figura 29.

É necessário ressaltar que BG1 e RG estão posicionados sobre um grande banco lamoso de sedimentos marcado por uma diminuição das correntes de enchente em direção ao sul, evidenciado pelo papel significativo da batimetria na circulação local (Bock 2010), o que pode favorecer este padrão de circulação atípico. O mapa de variação espaço-temporal do transporte de plásticos, a cada 1 hora durante as primeiras 45 horas após o lançamento, pode ser observado de forma mais detalhada no APÊNDICE A, cuja zona de “sombra” é verificada acentuadamente durante o primeiro ciclo de maré (vazante), em ambos os períodos sazonais.

A Figura 30 mostra a distribuição espacial e temporal da pluma de resíduos ao longo da Baía do Guajará e rio Guamá. Tanto no período seco quanto no chuvoso, os resíduos apresentaram concentrações inferiores a  $3,6 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$  (concentração residual) a partir do segundo dia de simulação. Assim, pode-se dizer que o transporte de plástico oriundo de um aporte pontual e temporário (1,17 g/s ao longo de 6h) ocorre, significativamente, apenas durante os quatro primeiros ciclos semidiurnos. A partir do qual, tende a ser diluído na Baía do Guajará frente à baixa concentração e à baixa janela de lançamento.

Ao analisar os 4 dias após o aporte de plásticos em preamar, ficou evidente que a pluma de resíduos (com concentrações entre  $1,8 \times 10^{-5}$  e  $1,8 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$ ) deixou completamente a Baía do Guajará a partir do quarto dia de simulação para o período chuvoso (Figura 30). Em contraste, no período seco, a pluma permaneceu no ambiente, em baixas concentrações, durante toda a sizígia (6 dias, Figuras 27 e 28). As maiores concentrações de plástico, inclusive as residuais, foram observadas nas zonas de retenção (BG1 e RG), possivelmente associadas à fatores como a idade da água, tempo de residência, assimetria da maré, morfologia local e variabilidade do poder de autodepuração da Baía, em ambos os cenários sazonais.

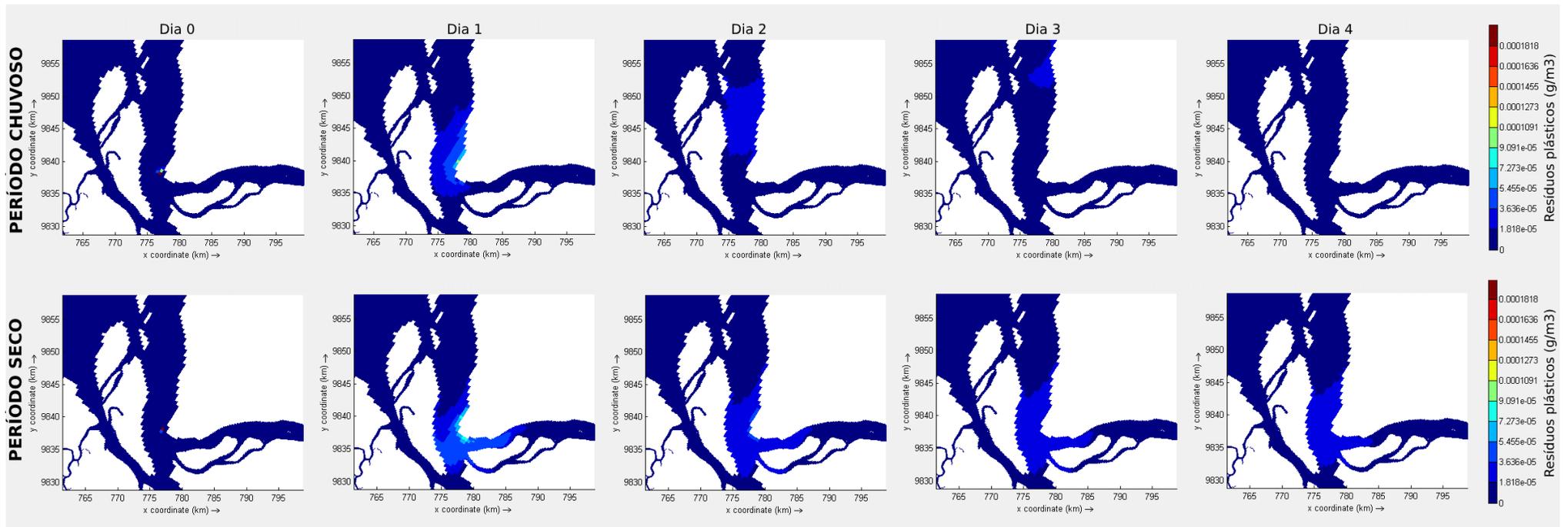


Figura 30: Variabilidade espaço temporal da pluma de transporte advectivo-dispersivo do plástico ( $\text{g/m}^3$ ), englobando: o dia do lançamento, após 1 dia, após 2 dias, após 3 dias e após 4 dias (da esquerda para a direita). As imagens diárias foram geradas próximo a preamar de sizígia, ao longo do período chuvoso (porção superior da Figura) e seco (porção inferior da Figura). Fonte: O autor.

Salienta-se que Rosa (2021) contabilizou, *in-situ*, aproximadamente 13.754 resíduos de lixo transportados dos rios Tucunduba e Tamandaré para o rio Guamá e Baía do Guajará. Porém, somente 5.900 resíduos foram registrados nas seções transversais examinadas na região fluvio-estuarina (Baía do Guajará, Acará e Guamá). Isso pode ser explicado pela significativa capacidade de autodepuração do sistema e pela presença de áreas de retenção temporária desses resíduos durante um ciclo de maré semidiurna (conforme observado nesta dissertação), gerando essas divergências observacionais.

Portanto, em resumo, as concentrações de plástico ao término da simulação durante o período seco foram maiores do que no período chuvoso em todos os pontos de observação. Essa dinâmica sugere que o período chuvoso contribui para o transporte e exportação de resíduos, enquanto o período seco tende a reter e acumular os resíduos plásticos em zonas específicas no interior do estuário. Essas zonas atuam como sumidouros do plástico lançado na Baía devido às suas características morfológicas e a complexa hidrodinâmica local (BG1 e RG).

Estudos anteriores mostraram que as correntes de enchente na Baía do Guajará e no rio Guamá são mais intensas do que as de vazante (Bock *et al.* 2011, Brasil 1962). Isso se deve à assimetria de maré positiva, que resulta em águas de enchente com menor tempo de duração e maior energia e potencial de transporte (Miranda 2002). Eventos de alta descarga também foram identificados como fatores que impulsionam o transporte de materiais (Van Emmerik *et al.* 2019). Esses dados corroboram os resultados deste estudo, que destacam a preferência pela exportação de resíduos no período chuvoso devido às maiores velocidades das correntes, decorrente ao aumento do aporte fluvial, capacidade de renovação e menor tempo de residência.

Além disso, processos de interação não investigados neste trabalho nas planícies de inundação podem ajudar a compreender a acumulação prolongada de plásticos em zonas específicas da Baía, especialmente em áreas vegetadas nas margens de estuários dominados por marés (Gonçalves *et al.* 2020). Núñez & Medina (2021) constataram que, no Norte da Espanha, a assimetria de maré na foz dos estuários influencia a presença de detritos plásticos. Os autores destacam que estuários dominados por maré de enchente mostram maior capacidade de importação de detritos do que estuários simétricos ou de vazante, o que também foi observado na Baía do Guajará (um estuário amazônico dominado por marés de enchente).

## 5 CONCLUSÃO

A investigação do tempo de renovação na Baía do Guajará, realizada por meio de um cenário piloto, revelou informações cruciais sobre os padrões de dispersão de substâncias conservativas, incluindo resíduos plásticos, em diferentes contextos climáticos. Durante o período chuvoso, constatou-se que as águas do cenário tinham uma alta capacidade de renovação, com mais de 70% da substância inicialmente presente no sistema sendo lavada em apenas 6 dias na foz da Baía do Guajará. Em contraste, no período seco, o tempo de renovação foi significativamente prolongado, com pouco menos de 60% de renovação em 64 dias, possivelmente devido à redução das descargas fluviais e à maior influência das marés, que atuaram como forças contrárias ao escoamento.

A análise da idade da água continental na Baía do Guajará também revelou variações sazonais significativas. Durante o período chuvoso, observou-se um rápido deslocamento das massas d'água, com tempos médios da idade da água continental variando de 2,28 a 15,32 dias para chegar em diferentes pontos de monitoramento dentro da área de estudo. No período seco, houve um aumento considerável no deslocamento da água doce proveniente das fronteiras, variando de 15,56 a 62,2 dias, indicando uma maior retenção das substâncias no sistema. Esses resultados evidenciam a vulnerabilidade sazonal do ambiente, fornecendo dados importantes à gestão ambiental e à mitigação dos impactos da contaminação por poluentes na Baía do Guajará.

Além disso, a análise das variabilidades espaço-temporais da idade da água pontual do rio Tamandaré indica que o tempo de residência das massas d'água despejadas por esse rio na Baía do Guajará é de aproximadamente 8,28 dias no período de maior descarga e 31,76 dias no período de menor descarga. Essas informações permitem estimar o tempo de transporte dos resíduos desde um rio urbano até a saída do sistema, possibilitando avaliar o impacto do descarte inadequado de detritos para além da área de origem (Bacia Hidrográfica do Tamandaré). Esses detritos podem chegar ao Oceano Atlântico Tropical em um intervalo de 36 a 63 dias, dependendo do período chuvoso ou seco, respectivamente. Isso destaca a influência da complexa hidrodinâmica amazônica no potencial de transporte e na eficácia da depuração de poluentes na região.

No modelo de transporte de plástico, foi possível inferir que a região costeira, próximo ao porto de Belém (BG1), apresenta uma circulação restrita, funcionando como uma zona de retenção temporária (sumidouro) dos plásticos lançados na Baía, pelo canal da Tamandaré.

Além disso, os resultados indicam que a posição geográfica da linha de costa da orla próximo ao Porto de Belém em relação ao canal de escoamento da Baía do Guajará tem relevância no padrão de circulação local, podendo criar zonas de “sombra” durante as marés vazantes.

A região costeira na porção sul da cidade de Belém (margem direita da foz do Rio Guamá - RG) indica ser um segundo ponto de retenção de resíduos no sistema, proporcionando o aprisionamento temporário de plásticos durante os primeiros ciclos de maré. Além disso, essa zona atua como exportador desses resíduos acumulados de volta à Baía do Guajará nos dias subsequentes ao término do aporte de plásticos. A importação inicial e a posterior exportação lenta de resíduos para a Baía, constatadas em RG, podem estar relacionadas à sua localização dentro do sistema. RG está situado numa região onde convergem as correntes de enchente e vazante, especificamente na confluência entre a foz do rio Guamá e a Baía do Guajará, marcada pela presença de vegetação marginal e baixa cota batimétrica (<4m), caracterizando uma zona de baixa energia.

Portanto, os resultados apresentados são fundamentais para entender a dinâmica de transporte de resíduos na região amazônica, especialmente durante o período seco. Este período indicou tornar a Baía do Guajará mais sensível à contaminação por plásticos, devido ao lento transporte de substâncias e menor capacidade de renovação das águas da baía neste cenário. Além disso, não se pode descartar a possibilidade de que outros tipos de traçadores conservativos de baixa densidade apresentem comportamentos semelhantes aos plásticos.

Conclui-se que estuários amazônicos dominados por maré com assimetria positiva podem favorecer a importação de resíduos, principalmente durante o período em que a influência das marés é acentuada (período seco). Durante o período de maior descarga fluvial (período chuvoso), há uma tendência maior para a exportação de resíduos, acompanhada por um aumento na capacidade de renovação do sistema de drenagem da Baía. As zonas temporárias de retenção de resíduos plásticos identificadas neste estudo ocorrem em ambos os períodos sazonais, situadas em regiões de baixa energia, sendo intensificadas no período seco e atenuadas no período chuvoso, de acordo com a variabilidade hidrodinâmica da região.

Embora o estudo tenha abordado detalhadamente as escalas de tempo relevantes para a dinâmica ambiental, é importante destacar que, sendo pioneiro para a Zona Costeira Amazônica (ZCA), este trabalho se limitou a avaliar o transporte de resíduos plásticos lançados em uma única maré vazante ao longo do dia. Não foram considerados o fluxo contínuo e o potencial acúmulo e saturação de plásticos no sistema ao longo de toda a simulação. Essa dissertação

representa um primeiro e importante passo para compreender e aprimorar a metodologia de transporte de plásticos no cenário amazônico.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuras pesquisas, recomenda-se manter ou estender o tempo de simulação além dos 64 dias, a fim de alcançar uma taxa de renovação superior a 70% durante o período de baixa descarga fluvial. Este período foi identificado como o principal fator limitante para uma análise completa desse parâmetro de escala de tempo no modelo atual. Além disso, sugere-se considerar as planícies de inundação como possíveis intensificadores das zonas de retenção temporária e incluir simulações de derivadores lagrangeanos. Isso permitiria analisar não apenas as análises eulerianas e os mapas espaço-temporais, mas também a trajetória individualizada dos plásticos superficiais em diferentes cenários.

É importante também avaliar a deposição de resíduos no fundo e analisar o tempo de residência desses resíduos em diferentes tipos de substrato. A relevância dessa análise é evidenciada por incidentes reais, como o naufrágio de uma embarcação no Porto de Vila do Conde - PA, que despejou cerca de 700 toneladas de óleo no estuário do rio Pará. Esse óleo foi detectado no substrato aproximadamente 3 anos após o incidente (Semas 2020), o que ressalta a necessidade de investigar a deposição e a interação dos resíduos plásticos com os sedimentos.

## REFERÊNCIAS

- Abelém A. G. 2018. Urbanização e remoção: por que e para quem?. 2ed. Belém, NAEA/UFPA, E-book 174p. Disponível em: <http://livroaberto.ufpa.br/jspui/handle/prefix/571>. Acesso em: 01 jan. 2024.
- Agência Nacional das Águas (ANA). 2017. *Atlas Esgotos: despoluição de Bacias Hidrográficas*. (Relatório Geral de Belém, 8p).
- Agência Nacional das Águas (ANA). 2020. *Atlas Esgotos: despoluição de Bacias Hidrográficas – sistemas existentes*. Disponível em: <http://snirh.gov.br>. Acesso em: 01 jan. 2024.
- Atlas do Plástico. 2020. *Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos*. [S.l.], Fundação Heinrich Böll. ISBN / DOI 978-65-87665-02-3. 64p.
- Associação Brasileira da Indústria do plástico (Abiplast). *Perfil 2019*. São Paulo, 53p. Disponível em: [https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil\\_2019\\_web\\_abiplast.pdf](https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil_2019_web_abiplast.pdf). Acesso em: 01 dez. 2022.
- Associação Brasileira da Indústria do plástico (Abiplast). *Perfil 2022*. São Paulo, 61p. Disponível em: [https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/09/perfil\\_2022\\_pt.pdf](https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/09/perfil_2022_pt.pdf). Acesso em: 25 nov. 2023.
- Andrady A. L. 2011. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, **62**(8): 1596-1605.
- Arcement Jr G.J. & Schneider V.R. 1989. *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. US., Geological Survey Water, 44p. (Supply Paper 2339).
- Baia R. D. P. F., Nunes L. M. C., Almeida D. A., Silva F. D. C. da, Chaves A. F. F. 2021. Qualidade de saneamento básico e saúde de moradores do entorno de áreas alagáveis no município de Belém/PA. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, **7**(4): 41267-41280.
- Belém. 2014. *Bacias Hidrográficas*. Disponível em: <https://codem.belem.pa.gov.br/mapas/bacias-hidrograficas/>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- Belém. 2020. *Plano Municipal de Saneamento Básico – volume III, sistema de esgotamento sanitário*. Disponível em: <https://arbel.belem.pa.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/VOLUME-III-SES.pdf>. Acesso em: 01 jun. de 2024.
- Brasil. 1962. *Diretoria de Hidrografia e Navegação - cartas de correntes de maré (rio Pará) de salinópolis a Belém*. Brasília, DF., Marinha do Brasil. 30p.
- British Plastics Federation (BPF). 2014. *A history of plastics*. Disponível em: [https://www.bpf.co.uk/plastipedia/plastics\\_history/Default.aspx](https://www.bpf.co.uk/plastipedia/plastics_history/Default.aspx). Acesso em: 23 jul. 2021.
- Brito L. S. A. 2007. *Intervenção no Centro Histórico e a Reorganização Sócio-espacial do Bairro da Cidade Velha – Belém/PA*. MS Dissertation, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Pará, Belém, 158p.

- Böck C. S. 2010. *Influência da morfologia do fundo na hidrodinâmica da Baía de Guajará (Pará)*. MS Dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 100p.
- Böck C. S., Assad L. P. F., Landau L. 2011. Influence of bottom morphology on the hydrodynamics of Guajará Bay (Amazon, Brazil). *Journal of Coastal Research*, SI 64:981-985.
- Borba T. 2014. *Sediment transport modelling in Pará river estuary (Amazon-Brazil)*. MS Dissertation, UNESCO-IHE, 50p.
- Borba T. A., & Rollnic M. 2016. Runoff quantification on Amazonian Estuary based on hydrodynamic model. *Journal of Coastal Research*, (75): 43-47.
- Cavalcanti I.R.A., Ferreira N.J., Silva M.G.A., Dias M.A.F.S. 2009. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de Textos, 464p.
- Companhia Docas do Pará (CDP). 2010. *Portal CDP - estatística 2010*. Disponível em: <https://www.cdp.com.br/estatisticas/>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- Companhia Docas do Pará (CDP). 2023. *Boletim gráfico 2023*. Disponível em: [https://www.cdp.com.br/wp-content/uploads/2024/02/BoletimGrafico\\_DEZEMBRO\\_-2023.pdf](https://www.cdp.com.br/wp-content/uploads/2024/02/BoletimGrafico_DEZEMBRO_-2023.pdf). Acesso em: 27 jan. 2024.
- Deltares. 2024a. *D-flow FM hydro- and morphodynamics user manual*. 1.1.124 ed.
- Deltares. 2024b. *D-water quality: user manual*. 3.14 ed.
- Deltares. 2024c. *D-water quality technical reference manual*. 5.01 ed.
- Dronkers J. & Zimmerman J. T. F. 1982. Some principles of mixing in tidal lagoons. *Oceanologica Acta*. Proceedings of the International Symposium on Coastal Lagoons, Bordeaux, France, p.107–117.
- Dutra V. A. B., Gonçalves P. V. S., Campos M. V. A., Tavares P. A., Beltrão N. E. S. 2018. Saneamento em áreas urbanas na amazônia: Aplicação do sistema de indicadores PEIR. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 7(2): 652-671.
- Eriksen M., Lebreton L. C., Carson H. S., Thiel M., Moore C. J., Borroero J. C., Galgani Franco, Ryan P.G., Reisser J. 2014. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS one*, 9(12): e111913.
- Fischer H. B., List E. J., Koh R. C. Y., Imberger J., Brooks N. H. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. [S.l.], Academic Press, 483p.
- García A., Juanes J. A., Álvarez C., Revilla J. A., Medina R. 2010. Assessment of the response of a shallow macrotidal estuary to changes in hydrological and wastewater inputs through numerical modelling. *Ecological Modelling*, 221(8): 1194-1208.
- Gleizon P., Punt A. G., Lyons, M. G. 2003. Modelling hydrodynamics and sediment flux within a macrotidal estuary: problems and solutions. *Science of the Total Environment*, 314: 589-597.
- Gonçalves F.D. & Souza Filho P.W.M. 2005. Integração digital de imagens Radarsat-1 e Landsat-7 para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na baía de Guajará (Belém-PA). In: 12º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, *Anais[...]*, p. 1789-1796.

- Goncalves M., Schmid K., Andrade M. C., Andrades R., Pegado T., Giarrizzo T. 2020. Are the tidal flooded forests sinks for litter in the Amazonian estuary?. *Marine Pollution Bulletin*, **161**: 111732.
- Gregório A. M. D. S. 2008. *Contribuição à gestão ambiental da Baía de Guajará (Belém-Pará-Amazônia) através de estudo batimétrico e sedimentológico*. MS Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 128p.
- Gregório A. M. D. S. & Mendes A. C. 2009. Batimetria e sedimentologia da baía do Guajará, Belém, estado do Pará, Brasil. *Amazônia: Ciência e Desenvolvimento*, **5**(9): 53-72p.
- Gregório A.M.S., Mendes A., Silva C.A. 2006. Depósitos Lamosos da Baía de Guajará (Pará, Amazônia, Brasil). In: I Semana Acadêmica dos Alunos de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, *Anais[...]*, p. 63-66.
- HydroQual-HDR. 2013. *Technical Memorandum: Calibration of Great Bay Estuary Hydrodynamic Model and Incremental Nitrogen Estimation*. (Relatório) 411p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Ibge). 2020. *Cidades e estados do Brasil*: Belém-PA. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/paronama>. Acesso em: 05 abr. 2020.
- Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará (Idesp). 1990. *Estudos integrados da Ilha do Marajó*. Belém, 333p.
- Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T. R., Perryman M., Andrady A., Law K. L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, **347**(6223): 768-771.
- Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho (Lapmar). 2023. *Ampliação e Complementação dos Estudos de Distribuição de Metais em Águas e Sedimentos de Barcarena e Abaetetuba Associado a Testes Ecotoxicológicos*. Belém. 2v, p. 267-376. (Relatório técnico, 09).
- Law K. L. 2017. Plastics in the marine environment. *Annual Review of marine science*, **9**: 205-229.
- Lebreton L. & Andrady A. 2019. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, **5**(1): 1-11.
- Lebreton L. C. M., Van Der Zwet J., Damsteeg JW, Slat B., Andrady A., Reisser J. 2017. River Plastic emissions to the world's oceans. *Nat Commun*, **8**(1): 1-10.
- Li H. 2010. Concepts and Applications of Water Transport Time Scales for Coastal Inlet Systems. US. Army Corps of Engineers. 13p.
- Mai L., Sun X. F., Xia L. L., Bao L. J., Liu, L. Y., Zeng E. Y. 2020. Global riverine plastic outflows. *Environmental Science & Technology*, **54**(16): 10049-10056.
- Miller R. L. & McPherson B. F. 1991. Estimating estuarine flushing and residence times in Charlotte Harbor, Florida. via salt balance and a box model. *Limnology and Oceanography*, **36**(3): 602-612.
- Miranda L. B., Castro B. M., Kjerfve B. 2002. *Princípios da Oceanografia Física em Estuários*. São Paulo, Edusp, 432p.

- Molinier M., Guyot J.L., Oliveira E., Guimarães V. 1996. Les regimes hydrologiques de l'Amazonie et de ses affluents. In: Chevallier P. & Pouyaud B. *L'hydrologie tropicale: géoscience et out il pour le développement*. Paris, IAHS Publishers, p. 209–222.
- Monsen N. E., Cloern J. E., Lucas L. V., Monismith S. G. 2002. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*, **47**(5): 1545-1553.
- Moraes B. C, Costa J. M. N., Costa A. C. L. 2005. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazônica*, **35**(2): 207–214.
- Nylander J. D. A. 2019. *Avaliação da utilização de comporta em eventos extremos de precipitação pluviométrica e de maré no canal de drenagem da Tamandaré*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 180p.
- Nittrouer C. A. & Demaster D. J. 1986. Sedimentary processes on the amazon continental shelf: past, present and future research. *Continental Shelf Research*, **6**: 5–30p.
- Núñez P., Castanedo S., Medina R. 2021. Role of ocean tidal asymmetry and estuarine geometry in the fate of plastic debris from ocean sources within tidal estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **259**: 107470.
- Observatório da Costa Amazônica (OCA). 2024. *A modelagem hidrodinâmica do Sistema Estuarino do rio Amazonas*. Disponível em: [https://oca.eco.br/pt\\_br/a-modelagem-hidrodinamica-do-sistema-estuarino-do-rio-amazonas/](https://oca.eco.br/pt_br/a-modelagem-hidrodinamica-do-sistema-estuarino-do-rio-amazonas/). Acesso em: 01 abr. 2024.
- Oltman R. E. 1968. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River. US., *Geological Survey Circular*, **552**: 16p.
- Plastics Europe. 2021. *Plastics: a history of more than 100 years of innovation*. Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics/history>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- Plastics Europe. 2022. *Plastics – the Facts 2022*. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- Prestes Y.O. 2016. *Interações físicas entre o estuário do Rio Pará e a Plataforma Continental no norte do Brasil*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 122p.
- Prestes Y.O., Rollnic M., Silva M.S., Rosário R.P. 2014. Volume transport in the tidal limit of the Pará River, Brazil, In: Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas conference, Porto de Galinhas, *Anais[...]*, p. 19-24.
- Prestes Y.O., Silva, A. C., Rollnic M., Rosário R. P. 2017. The M2 and M4 tides in the Pará River Estuary. *Tropical Oceanography*, **45**: 26-37.
- Prestes Y.O., Borba T.A.C., da Silva A. C., Rollnic M. 2020. A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **28**: 100668.
- Richey J. E., Meade R. H., Salati E., Devol A. H.; Nordin, C. F., Santos U. D. 1986. Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon River: 1982–1984. *Water Resources Research*, **22**(5): 756–764.

- Rosa G. P. 2021. *Transporte de resíduos sólidos flutuantes em rios urbanos dominados por maré na região norte do Brasil*. MS Dissertation, Universidade Federal do Pará, Belém, 51p.
- Rosa G. P., Costa M. S., Monteiro S. M. 2023. Do urban rivers in the amazon coast trap macroplastic?. *Marine Pollution Bulletin*, **189**: 114757.
- Rosário R.P. 2016. *Análises de processos oceanográficos no estuário do rio Pará*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 139p.
- Rosário R. P., Borba T. A., Santos A. S., Rollnic M. 2016. Variability of salinity in Pará River Estuary: 2D analysis with flexible mesh model. *Journal of Coastal Research*, **75**(10075): 128-132.
- Saraiva A. L. L. 2007. *Estudo sedimentológico e geoquímico em sedimentos de fundo da baía do Guajará-Belém (PA)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 122p.
- Schmidt C., Krauth T., Wagner S. 2017. Export of plastic debris by rivers into the sea. *Environmental Science & Technology*, **51**(21):12246-12253.
- Secretaria do Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará (Semas). 2020. *Gerenciamento Costeiro no Estado do Pará*. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/>. Acesso em: 01 dez. 2023.
- Silva B. D. A. da., Nylander J. D. A., Pereira, J. A. R. 2020. Análise do Lançamento de Esgoto Sanitário no Canal de Drenagem da Bacia Hidrográfica da Tamandaré/Belém–Pará. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **9**(3): 92-109.
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (Snis). 2021. *Diagnósticos 2021– Série Histórica*. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- Souza P. A. da Silva, Santos V. C. P., da Cunha J. A., Pinto E. S. 2022. A questão dos resíduos sólidos em Belém-PA: A realidade do bairro do Guamá. In: 5º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Gramado, *Anais[...]*, p. 6-7. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.5.22.IV-025>. Acesso em: 01 jun. 2024.
- Souza R. C. O. de. 2019. Análise dos instrumentos de planejamento e das condições de drenagem de águas pluviais da área central do município de Belém/PA. *Revista GeoAmazônia*, **7**(14): 197-216.
- Thushari G. G. N., Chavanich S., Yakupitiyage A. 2017. Coastal debris analysis in beaches of Chonburi Province, eastern of Thailand as implications for coastal conservation. *Marine Pollution Bulletin*, **116**(1-2): 121-129.
- Thushari G. G. N. & Senevirathna J. D. M. 2020. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, **6**(8).
- Van Emmerik T., Van Klaveren J., Meijer L. J., Krooshof J. W., Palmos D. A. A., Tanchuling M. A. 2020. Manila river mouths act as temporary sinks for macroplastic pollution. *Frontiers in Marine Science*, **7**: 545812.

Van Emmerik T., Tramoy R., Van Calcar C., Alligant S., Treilles R., Gasperi J., Tassin B. 2019. Seine plastic debris transport tenfolded during increased river discharge. *Frontiers in Marine Science*. 6:642.

Xie M., Zhang W., Guo W. 2010. A validation concept for cohesive sediment transport model and application on Lianyungang Harbor, China. *Coastal Engineering*, **57**(6): 585-596.

Wu Y., Falconer R. A., Uncles R. J. 1999. Modelling of water flows and cohesive sediment fluxes in the Humber Estuary. UK., *Marine Pollution Bulletin*, **37**(3-7): 182-189.

Zimmerman J. T. F. 1988. Estuarine residence times, *In: Kjerfve B. Hydrodynamics of estuaries*. 1ed. Boca Raton, CRC Press, p. 75-84.

## APÊNDICE A

A.1: VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PLUMA DE TRANSPORTE DE RESÍDUOS PLÁSTICOS A CADA 1 HORA APÓS O LANÇAMENTO (DURANTE 45H), NO PERÍODO CHUVOSO.

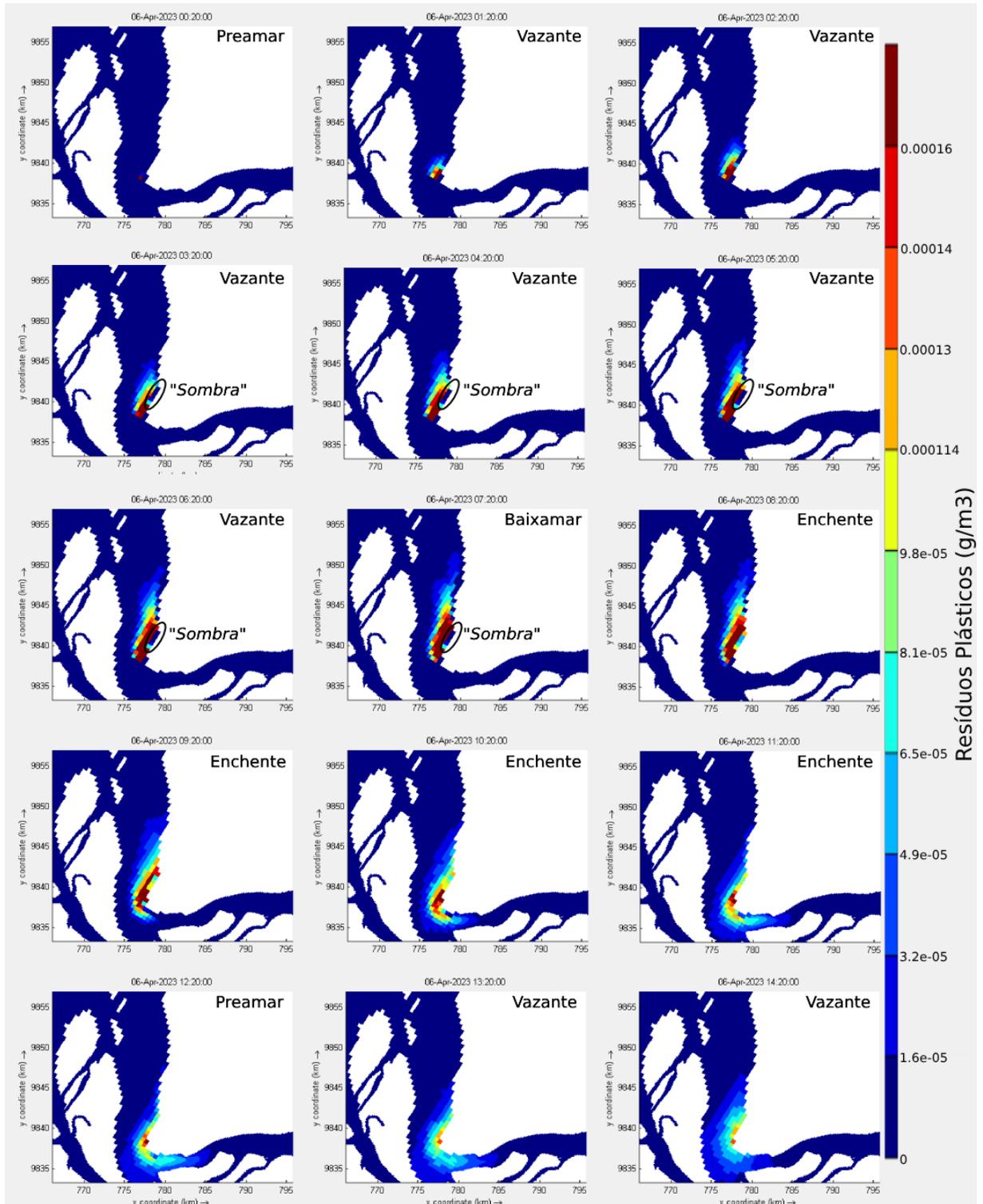


Figura A.1: Variação espaço-temporal do comportamento dos resíduos plásticos na Baía do Guajará e rio Guamá durante as marés enchentes e vazantes, com ênfase na primeira maré vazante pós lançamento dos resíduos em que é possível observar a zona de “sombra” formada na orla de Belém próximo ao porto. Esta figura representa as primeiras 15h após o lançamento do plástico, no período chuvoso, em sizígia. Fonte: O autor.

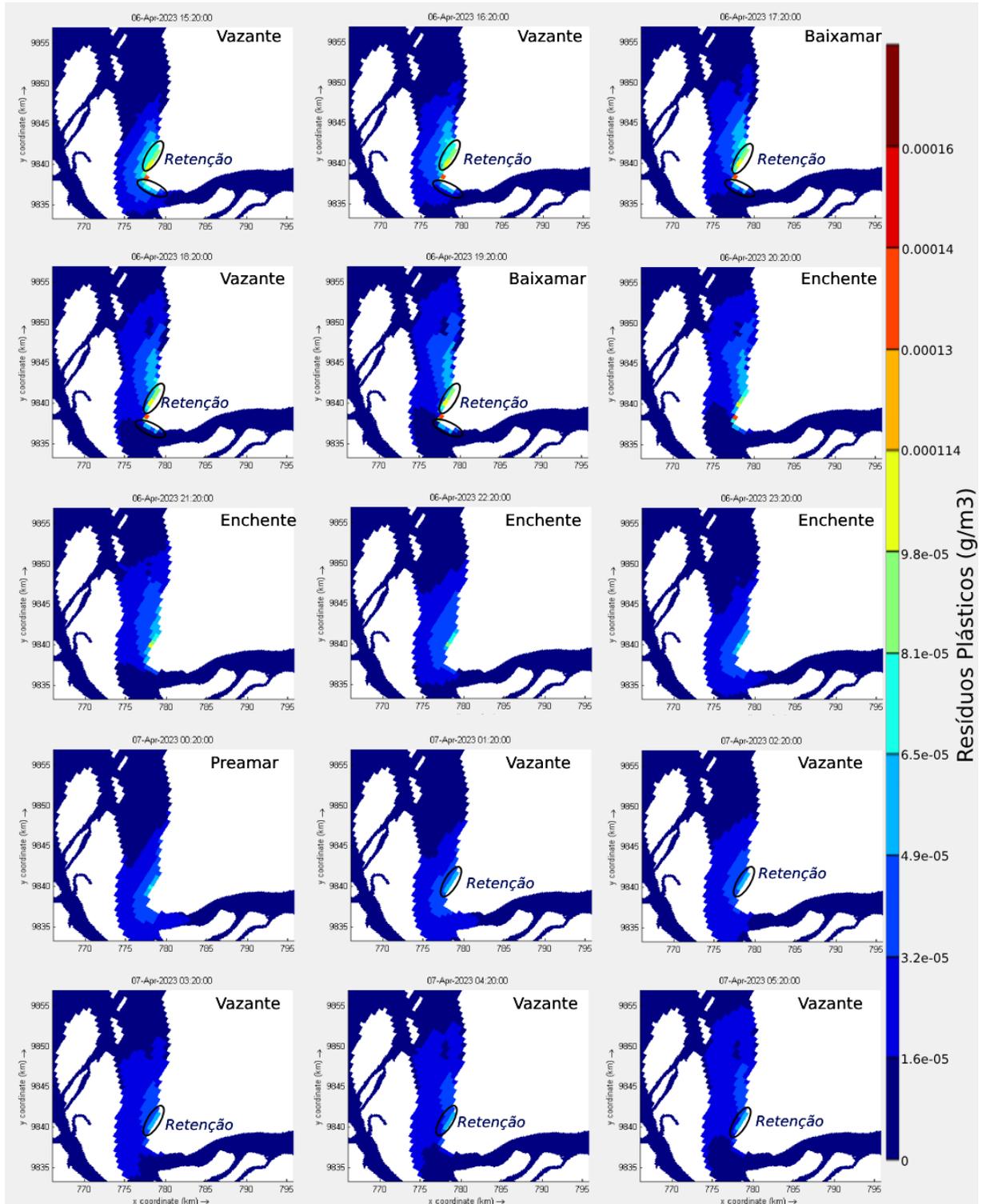


Figura A.2: Variação espaço-temporal do comportamento dos resíduos plásticos na Baía do Guajará e rio Guamá durante as marés enchentes e vazantes, com ênfase nas zonas de retenção (sumidouros) de resíduos formada durante as marés vazantes, em detrimento da “sombra” que é formada na orla cuja linha de costa é recuada (BG1) e na orla sobre a margem direita da foz do rio Guamá (RG), cuja morfologia local é atípica e de baixa energia. Esta figura representa de 16-30h após o lançamento do plástico, no período chuvoso, em sizígia. Fonte: O autor.

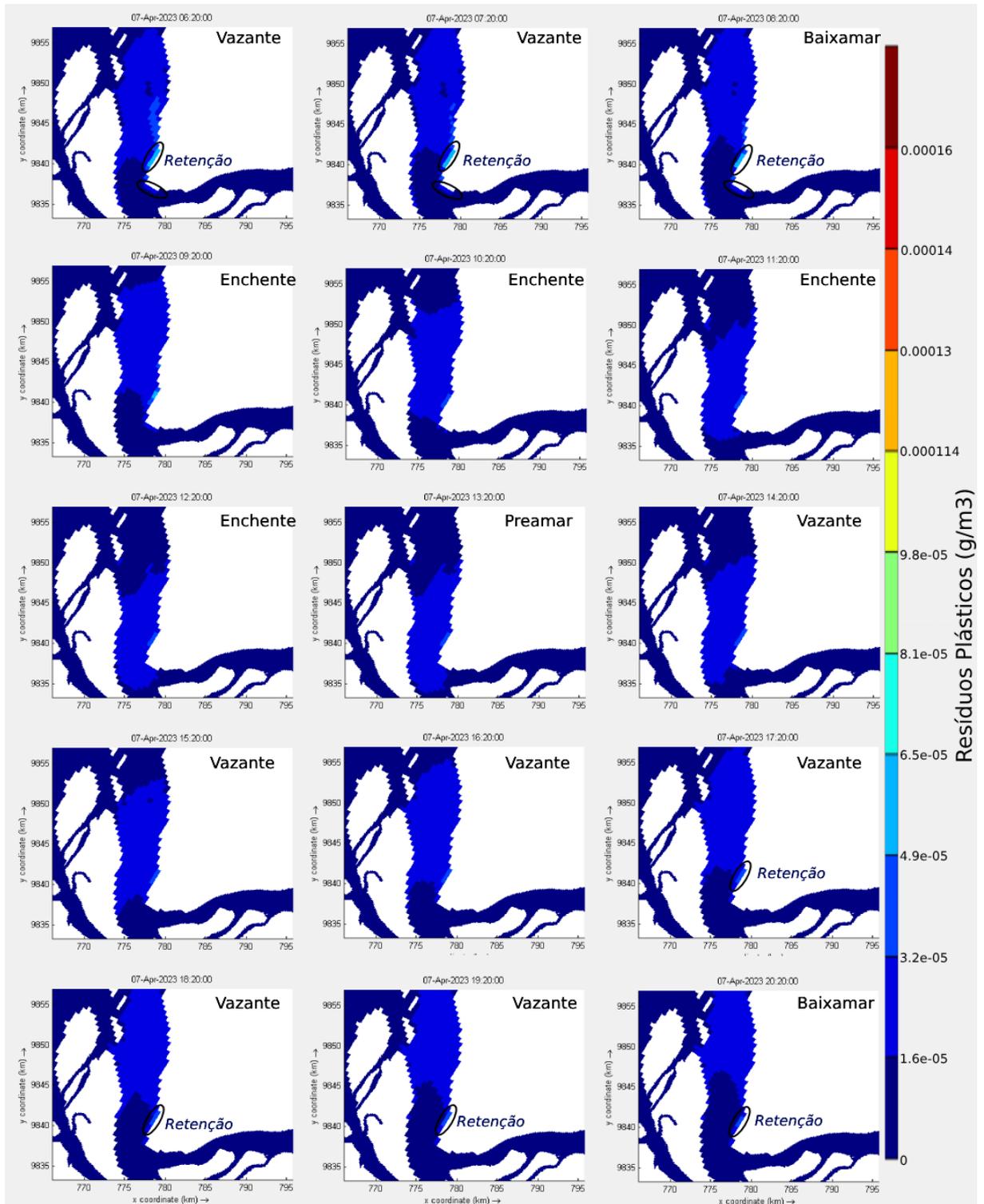


Figura A.3: Variação espaço-temporal do comportamento dos resíduos plásticos na Baía do Guajará e rio Guamá durante as marés enchentes e vazantes, com ênfase nas zonas de retenção (sumidouros) de resíduos formada durante as marés vazantes, em detrimento da “sombra” que é formada na orla cuja linha de costa é recuada (BG1) e na orla sobre a margem direita da foz do rio Guamá (RG), cuja morfologia local é atípica e de baixa energia. Esta figura representa de 31-45h após o aporte de plástico, no período chuvoso, em sizígia. Fonte: O autor.

A.2: VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PLUMA DE TRANSPORTE DE RESÍDUOS PLÁSTICOS A CADA 1 HORA APÓS O LANÇAMENTO (DURANTE 45H), NO PERÍODO SECO.

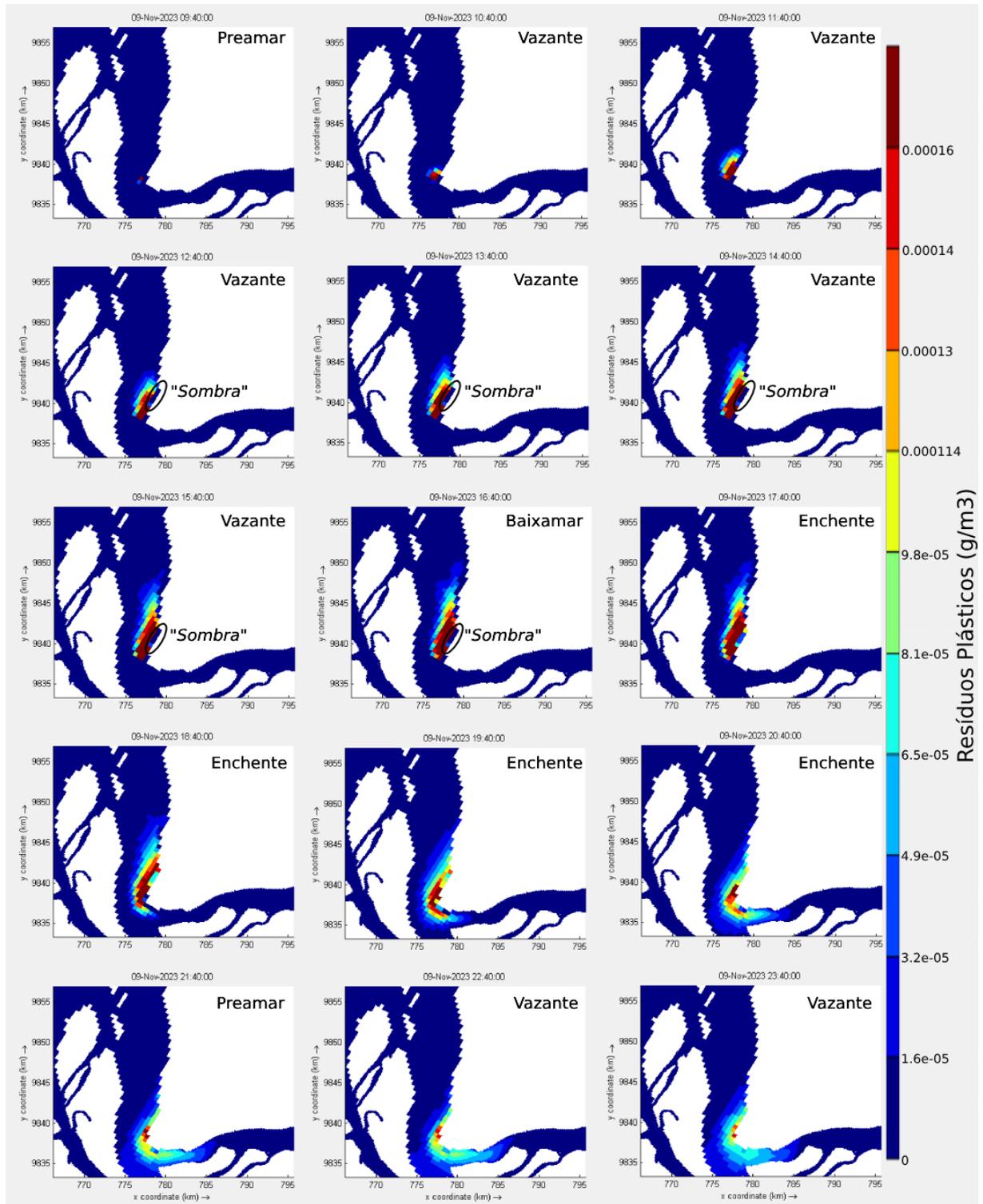


Figura A.4: Variação espaço-temporal do comportamento dos resíduos plásticos na Baía do Guajará e rio Guamá durante as marés enchentes e vazantes, com ênfase na primeira maré vazante pós lançamento dos resíduos em que é possível observar a zona de “sombra” formada na orla de Belém próximo ao porto. Esta figura representa as primeiras 15h após o lançamento do plástico, no período seco, em sizígia. Fonte: O autor.

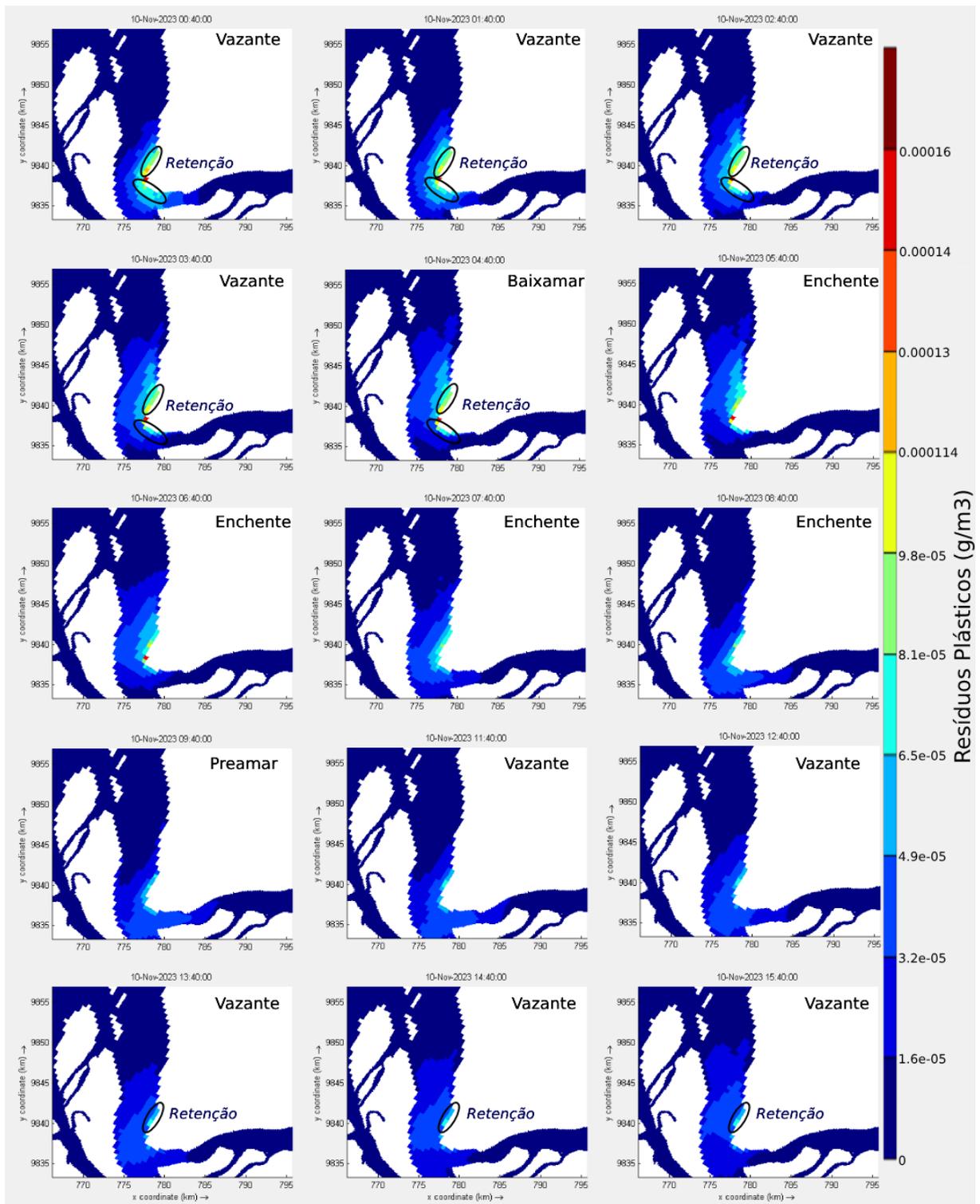


Figura A.5: Variação espaço-temporal do comportamento dos resíduos plásticos na Baía do Guajará e rio Guamá durante as marés enchentes e vazantes, com ênfase nas zonas de retenção (sumidouros) de resíduos formada durante as marés vazantes, em detrimento da “sombra” que é formada na orla cuja linha de costa é recuada (BG1) e na orla sobre a margem direita da foz do rio Guamá (RG), cuja morfologia local é atípica e de baixa energia. Esta figura representa de 16-30h após o aporte de plástico no período seco, em sizígia. Fonte: O autor.

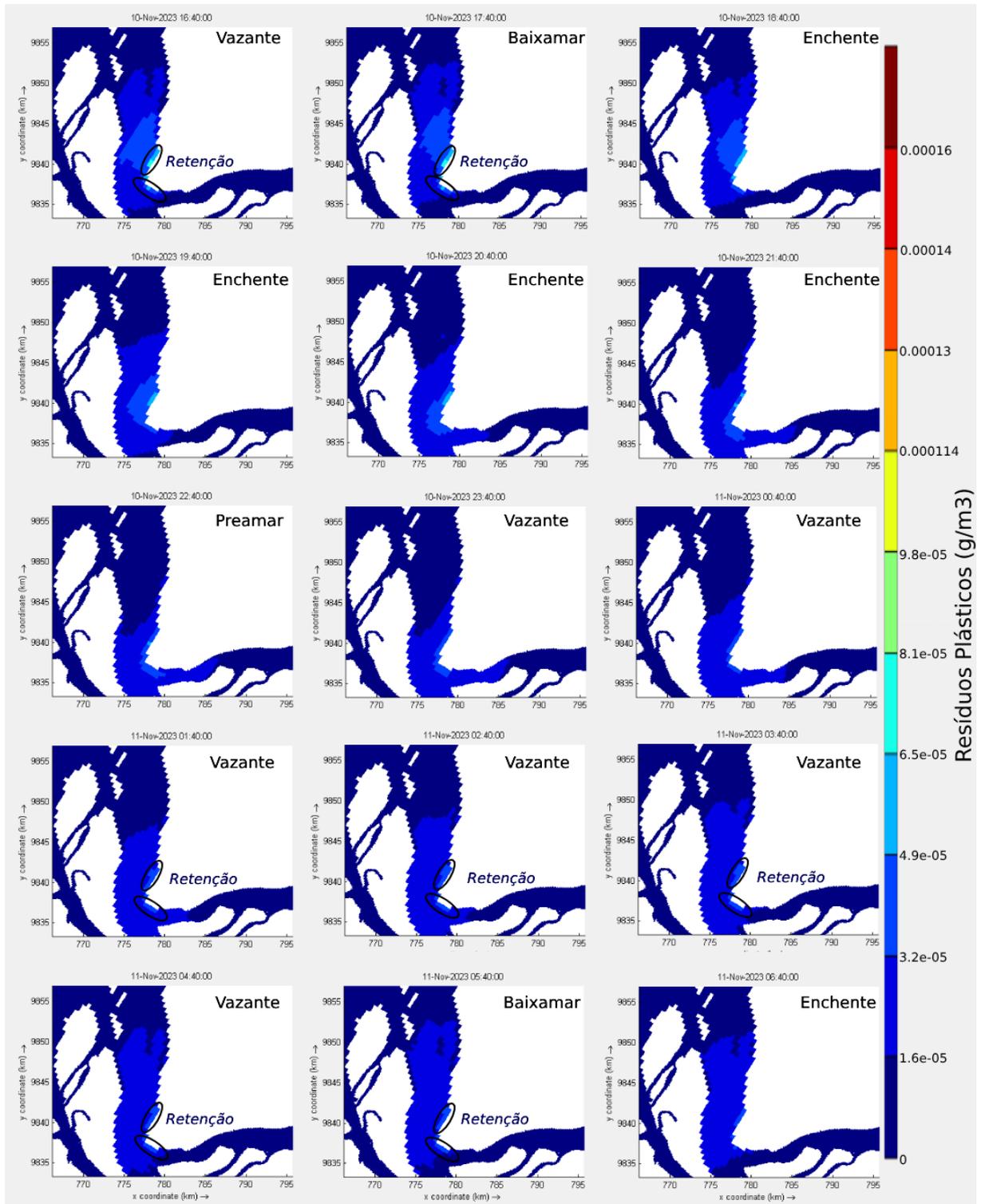


Figura A.6: Variação espaço-temporal do comportamento dos resíduos plásticos na Baía do Guajará e rio Guamá durante as marés enchentes e vazantes, com ênfase nas zonas de retenção (sumidouros) de resíduos formada durante as marés vazantes, em detrimento da “sombra” que é formada na orla cuja linha de costa é recuada (BG1) e na orla sobre a margem direita da foz do rio Guamá (RG), cuja morfologia local é atípica e de baixa energia. Esta figura representa de 31-45h após o aporte de plástico no período seco, em sizígia. Fonte: O autor.